

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Klemen Govedić**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Dr. sc. Petar Čurković, dipl. ing.

Student:

Klemen Govedić

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svojoj obitelji na moralnoj i financijskoj podršci, strpljenju i povjerenju koje su mi pružili tijekom studiranja i za vrijeme izrade diplomskog rada. Zahvaljujem se voditelju rada, dr. sc. Petru Ćurkoviću koji mi je omogućio izradu diplomskog rada, zahvaljujem mu na kvalitetnoj stručnoj pomoći, korisnim savjetima i prijedlozima te pomoći pri pronalasku odgovarajuće literature.

Klemen Govedić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **KLEMEN GOVEDIĆ**

Mat. br.: 0035188382

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku: **OBLIKOVANJE MEKOG MOBILNOG ROBOTA**

Naslov rada na  
engleskom jeziku: **DESIGN OF A SOFT MOBILE ROBOT**

Opis zadatka:

Meki robotski sustavi (*soft robotic systems*) pripadaju domeni robotskih sustava izrađenih od mekih i deformabilnih materijala poput silikona, plastike, gume te elastičnih metalnih dijelova poput opruga. Za razliku od konvencionalnih robotskih sustava, meki roboti mogu biti podvrgnuti iznimno velikim strukturnim deformacijama, sigurni su za rad u neposrednoj ljudskoj okolini, otporni su na mehanička oštećenja i jeftiniji su za izradu.

Sve navedeno rezultiralo je recentnim interesom istraživača u području robotike za mekim robotima i njihovoj primjeni u različitim djelatnostima, između ostalih: medicinskim, edukacijskim i vojnim.

U okviru ovog rada potrebno je:

- Istražiti dostupnu literaturu i opisati principe rada mekih robota.
- Ispitati mogućnost primjene memorijskih legura za pokretanje mekog robota.
- Odabrati materijal pogodan za izradu mekog robota.
- Oblikovati kalup mekog robota te ga izraditi na uređaju za brzu izradu prototipova.
- Odabrati odgovarajući upravljački kontroler te napisati pripadajuće programske kodove.
- Izraditi prototip mekog mobilnog robota te ispitati njegovu funkcionalnost.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu te eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

9. ožujka 2017.

Rok predaje rada:

11. svibnja 2017.

Predviđeni datum obrane:

17., 18. i 19. svibnja 2017.

Zadatak zadao:

dr. sc. Petar Čurković, doc.

Predsjednica Povjerenstva:

dr. sc. Biserka Runje, red. prof.



# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Meka robotika</b>	<b>2</b>
2.1	Uvod u meku robotiku . . . . .	2
2.2	Uloga mekih robota . . . . .	2
2.3	Konstrukcija mekih robota . . . . .	3
2.4	Podjela mekih robota . . . . .	4
2.5	Primjena mekih robota . . . . .	6
2.6	Razvoj mekih robota u budućnosti . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Memorijske legure</b>	<b>9</b>
3.1	Uvodno o memorijskim legurama . . . . .	9
3.2	Osnovni strujni krug memorijskih legura . . . . .	10
3.3	Funkcioniranje memorijskih legura . . . . .	11
3.4	Metali za izradu memorijskih legura . . . . .	14
3.5	Povijest metalnih legura . . . . .	14
3.6	Primjena metalnih legura . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Implementacija memorijskih legura</b>	<b>18</b>
4.1	Proizvodnja memorijskih legura . . . . .	18
4.2	Fizičke karakteristike mišićnih žica . . . . .	19
4.2.1	Promjer . . . . .	19
4.2.2	Polumjer savijanja . . . . .	19
4.2.3	Sile . . . . .	20
4.2.4	Električna svojstva . . . . .	22
4.2.5	Temperaturna svojstva . . . . .	23
4.2.6	Brzina . . . . .	24
4.3	Izvori energije . . . . .	25
4.4	Spajanje . . . . .	26
4.5	Tehnički podaci . . . . .	26

<b>5</b>	<b>Materijali za izradu mekih robota</b>	<b>28</b>
5.1	Elastomeri . . . . .	28
5.2	Silikoni . . . . .	28
5.2.1	Silikonske gume . . . . .	29
5.2.2	RTV silikoni . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Projektiranje mekog robota</b>	<b>32</b>
6.1	Teorija puzanja . . . . .	32
6.2	Koncept mekog robota . . . . .	36
6.3	Odabir silikona za izradu mekog robota . . . . .	37
6.3.1	Tehnički podaci . . . . .	37
6.3.2	Miješanje . . . . .	37
6.3.3	Lijevanje . . . . .	38
6.4	Odabir aktuatora mekog robota . . . . .	38
<b>7</b>	<b>Konstrukcija kalupa</b>	<b>39</b>
7.1	Modeliranje robota . . . . .	39
7.2	Modeliranje kalupa . . . . .	41
<b>8</b>	<b>Izrada mekog robota</b>	<b>43</b>
8.1	Izrada kalupa . . . . .	43
8.1.1	Aditivna proizvodnja . . . . .	43
8.1.2	PolyJet postupak . . . . .	44
8.2	Lijevanje kalupa . . . . .	44
8.3	Priprema aktuatora . . . . .	45
8.4	Umetanje aktuatora . . . . .	46
<b>9</b>	<b>Upravljačka elektronika</b>	<b>48</b>
9.1	Odabir mikrokontrolera . . . . .	48
9.2	Tranzistorske sklopke . . . . .	49
9.3	Spajanje robota sa elektroničkom podrškom . . . . .	50
9.4	Programiranje robota . . . . .	51

<b>10 Ispitivanje mekog robota</b>	<b>53</b>
10.1 Nožice . . . . .	53
10.2 Deformacije robota . . . . .	54
10.3 Ciklus koraka . . . . .	55
10.4 Puzanje . . . . .	57
<b>11 Zaključak</b>	<b>58</b>
<b>12 Literatura</b>	<b>59</b>
<b>13 Dodaci</b>	<b>60</b>

## Popis slika

1	Pneumatski mišić . . . . .	4
2	Meki robot pogonjen pneumatskim mišićima . . . . .	4
3	The Meshworm . . . . .	5
4	The GoQBot . . . . .	5
5	Robotska hvataljka napravljena od kave . . . . .	6
6	Robotska hvataljka s pneumatskim mišićima . . . . .	7
7	DelFly . . . . .	7
8	Struktura Effileovog tornja . . . . .	8
9	Memorijske legure . . . . .	9
10	Osnovni strujni krug memorijskih legura . . . . .	10
11	Osnovni shematski stujni krug memorijskih legura . . . . .	11
12	Mehanizam pamćenja obika . . . . .	12
13	Kontrakcija mišićnih žica . . . . .	13
14	Temperaturna histereza memorijskih legura . . . . .	13
15	Metali za izradu memorijskih legura . . . . .	14
16	Kotač pogonjen Nitinol oprugama (eng. Heat Motor) . . . . .	16
17	Robotska ruka s mišićnim žicama . . . . .	16
18	Proizvodnja memorijskih legura . . . . .	18
19	Izrada Nitinol opruga . . . . .	19
20	Minimalni polumjer savijanja . . . . .	19
21	Graf naprezanje - istežanje . . . . .	21
22	Graf temperaturnih promjena . . . . .	23
23	Izvori energije . . . . .	25
24	Spajanje žica . . . . .	26
25	Silikoni . . . . .	28
26	Vulkanizacija silikona . . . . .	30
27	Lijevanje silikona . . . . .	31
28	Pokret gusjenice . . . . .	32
29	Osnovni segment . . . . .	33

30	Osnovni pokret . . . . .	33
31	Ciklus pokreta . . . . .	34
32	Faze pokreta . . . . .	35
33	Prikaz osnovnih dijelova robota . . . . .	36
34	Glava robota . . . . .	36
35	Specifikacije opruga . . . . .	38
36	Osnovni okvir robota . . . . .	39
37	Osnovni model robota . . . . .	39
38	Konstrukcija nožica . . . . .	39
39	Praznina između nožica . . . . .	40
40	Multiplikacija nožica . . . . .	40
41	Redukcija nepotrebnog materijala . . . . .	40
42	Kosine za lakše vađenje iz kalupa . . . . .	41
43	3D model mekog robota . . . . .	41
44	Modeliranje kalupa . . . . .	41
45	Kalup mekog robota . . . . .	42
46	Kalup . . . . .	43
47	Kalup i odljevci . . . . .	44
48	Priprema spojnih elemenata . . . . .	45
49	Priprema aktuatora . . . . .	45
50	Montiranje aktuatora u kalup . . . . .	46
51	Lijevanje . . . . .	46
52	Vađenje robota iz kalupa . . . . .	47
53	Osušen robot . . . . .	47
54	Shema upravljanja . . . . .	48
55	Arduino UNO AtMega 328 . . . . .	48
56	Shema tranzistorske sklopke . . . . .	49
57	Tranzistorske sklopke za razvojnoj pločici . . . . .	49
58	Shema sklop robota i elektroničke podrške . . . . .	50
59	Sklop robota i elektroničke podrške . . . . .	51

60	Nožice . . . . .	53
61	Zapinjanje nožica za podlogu . . . . .	53
62	Razlika deformacija u ovisnosti o visini leđa . . . . .	54
63	Deformacije pojedinih režnjeva . . . . .	55
64	Ciklus robota . . . . .	56
65	Pomak kod dužeg puzanja . . . . .	57

## Popis tablica

1	Podaci sila za paralelan rad mišićnih žica [2] . . . . .	17
2	Minimalni polumjer savijanja [2] . . . . .	20
3	Tehnički podaci prema temperaturi [2] . . . . .	26
4	Tehnički podaci prema promjeru žice [2] . . . . .	27
5	Tehnički podaci legura [3] . . . . .	27
6	ALPA-SIL MF 3 [5] . . . . .	37
7	Tehnički podaci Nitinol opruga . . . . .	38

## Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
U	V	napon
I	A	jačina struje
T	$^{\circ}\text{C}$	temperatura
P	W	snaga
	$\mu\Omega\text{cm}$	volumenski otpor
	$\Omega$	unutarnji otpor
$A_s$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura početka aktivacije
$A_f$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura kraja aktivacije
$M_s$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura početka relaksacije
$M_s$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura kraja relaksacije
	$\text{W}/\text{cm}^{\circ}\text{C}$	termička provodnost
	$\text{J}/\text{kgK}$	toplinski kapacitet
	$\text{kg}/\text{m}^3$	gustoća
	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	viskozitet
	Shore A	tvrdća
	MPa	vlačna čvrstoća
	$\text{N}/\text{mm}$	otpornost prema kidanju



## Sažetak

Meka robotika (eng. soft robotics) je grana robotike koja se bavi robotima izgrađenih od mekih i deformabilnih materijala kao što su polimeri, silikon, guma, tkanina te mehaničkim dijelovima kao što su opruge. Grupa aktuatora koja ima najveću uporabu u mekoj robotici su memorijske legure (eng. Shape Memory Alloys, SMA). To su legure koje imaju sposobnost pamćenja oblika i vraćanje u prvobitni položaj, a promjena se događa kod promjene temperature. Jedan od zadataka meke robotike je prilagodljivost i stvaranje robota koji su više nalik organizmima iz prirode i svakodnevnog života. Dnevne ljudske radnje kao što su hodanje po stepenicama, kretanje po prostoru, hvatanje i premještanje objekta. Takvi roboti koriste se prvenstveno u istraživanjima i trenutno nemaju nikakvu generalnu primjenu.

Konstruirani mobilni robot izrađen je od dvokomponentni silikona u kojeg su uronjene i aktuatori u obliku opruga načinjeni od memorijskih legura. Opruge se koriste kao aktivni aktuatori koji deformiraju tijelo od silikona, dok je silikon pasivna komponenta koja vraća robot u početno stanje. Deformacija koja se ostvarjuje pomiče robot po podlozi na kojoj se nalazi. Robot pokreće mikroprocesor sa tranzistorskim sklopkama koje u određenim vremenskim intervalima pokreću određene aktuatore. Robot nije u potpunosti autonoman budući da na sebi ne nosi spremnike energije, već za sobom povlači žice koje ga opskrbljuju sa električnom energijom. Pokret koji robot postigne u jednoj minuti je polovica njegove ukupne duljine tijela.

**Ključne riječi:** meka robotika, mobilni robot, memorijske legure, dvokomponentni silikon, mikroprocesorsko upravljanje, tranzistorska sklopka

## Summary

Soft Robotics is dealing with robots built from soft and deformable materials such as polymers, silicones, rubber, fabric and mechanical parts such as springs. The actuator group that has the greatest use in a soft robot are Shape Memory Alloys (SMA). These are alloys that have the ability to remember shape, wrap into the original position, and change occurs when the temperature changes. One of the tasks of soft robotics is the adaptability and creation of robots that are more like organisms of nature and everyday life. Daily human activities such as walking down the stairs, moving around space, capturing and moving objects. Such robots are used primarily in research and do not currently have any general application.

The constructed mobile robot is made of silicone in which immersed spring shaped actuators are made of memory alloys. The springs are used as active actuators that deform the silicone body, while the silicon passive component restores the robot to its initial state. The deformation generated by the robot moves the substrate on which it is located. The robot drives a microprocessor with transistor switches that trigger certain actuators at certain time intervals. The robot is not completely autonomous because it does not carry any tanks of energy, but pulls the wires that supply it with electricity. The movement that the robot achieves in one minute is half its total body length.

**Key Words:** Soft Robotics, mobile robot, Shape Memory Alloys, microprocessor control, two-component silicon, transistor switches

# 1 Uvod

Meka robotika je grana robotike koja u većini slučajeva djeluje još u laboratorijskim uvjetima. Razvila se razvijenim zapadnim zemljama i Japanu. Bavi se primitivnim mehanizmima koji prvenstveno oponašaju prirodne pokrete i radnje.

U sljedećim poglavljima navedene su osnovne činjenice o ovom novom području u robotici, njihova primjena, uloga i razvitak. Jedna od glavnih točaka ovog rada je sama konstrukcija i materijali koji se koriste za izradu mekih robota. Meki roboti ne koriste klasične pogone poput električnih motora ili motora na fosilna goriva. Aktuatori za pogon mekih robota su pneumatski mišići i memorijske legure. Memorijske legure su materijali koji imaju sposobnost pamćenja oblika i vraćanja u njega.

U sklopu ovog rada izrađen je mobilni meki robot. Tijelo robota je izgrađeno od silikona, a aktuatori su opruge napravljene od memoriskih legura. Svaki od navedenih komponenti ima svoju funkciju. Opruge se koriste kao aktivni aktuatori koji deformiraju tijelo od silikona, dok je silikon pasivna komponenta koja vraća robot u početno stanje. Deformacija koja se ostvarjuje pomiče robot po podlozi na kojoj se nalazi.

## 2 Meka robotika

### 2.1 Uvod u meku robotiku

Meka robotika (*eng. soft robotics*) je grana robotike koja se bavi robotima izgrađenih od mekih i deformabilnih materijala kao što su polimeri, silikon, guma, tkanina te od mehaničkih dijelova kao što su opruge.

Tradicionalni roboti su najčešće konstruirani od čelika, aluminijske i tvrdih polimera. Pogonjeni su električnim motorima ili pumpama na fluidni medij. Takvi su strojevi sposobni svladavati velike sile i postići visoku točnost u jako kratkom vremenu, što ih čini jako produktivnima i isplativima. Većina takvih robota vidljiva je u industrijskoj okolini u brzom proizvodnji. Također, neki od takvih robota mogu biti primijenjeni u prirodi u blizini čovjeka.

Meki roboti (*eng. soft robots*) mogu postizati velike deformacije zahvaljujući svojim mekim i deformabilnim strukturama koje se mogu prilagoditi prirodi ili nekoj drugoj aplikaciji u kojoj se primjenjuje. Takvi roboti su vrlo često nadahnuti prirodom koja je neograničen kapacitet ideja za tehničku primjenu. Načinjeni su od materijala koji su jeftiniji i lakši od čelika i jednostavniji za upotrebu. No, treba uzeti i u obzir da meki roboti zasad u većini slučajeva obavljaju primitivne funkcije kao što su puzanje, hvatanje predmeta i tome slično. Iako obavljaju primitivne funkcije, njihovo modeliranje i konstrukcija mogu biti jako zahtjevni, budući da kretanje robota zbog deformabilnih materijala može biti nepredvidivo.

### 2.2 Uloga mekih robota

Jedan od zadataka meke robotike je prilagodljivost i stvaranje robota koji su više nalik organizmima iz prirode i svakodnevnog života. Dnevne ljudske radnje kao što su hodanje po stepenicama, kretanje po prostoru te hvatanje i premještanje objekta čovjek percipira kao jako jednostavne, ali u području robotike su to jako komplicirane pa i djelomično neizvedive radnje.

Razlog tog problema je u tome što klasične robote upravljamo s velikom točnošću, konstantno se prati njihov položaj i plan kretanja s jako tvrdom karakteristikom. To je između ostalog nužno, budući da takvi roboti mogu bez problema oštetiti sebe ili okolinu oko sebe, ako u upravljačkom smislu dođu u nestabilno stanje. Pokretanje takvih robota postaje kompliciranije ako robot ima puno stupnjeva slobode gibanja ili više načina da pokrenu svoje tijelo. Stupanj kompliciranosti se povećava kada robota stavimo u čovjekovu okolinu gdje dolazi do nepredvidivih situacija. Roboti nisu u stanju razabrati sve situacije oko sebe i interpretirati ih.

Neke od tih kalkulacija mogu se reducirati u samoj konstrukciji. Koncept robota može sadržavati mehanička svojstva materijala od kojeg je konstruiran. Meki materijali često imaju nelinearan odziv na silu, kao što je viskoznost, anizotropiju i slično. Također, različiti meki materijali mogu biti uključeni u različite funkcionalne dijelove robota.

Upotreba mekih materijala je jedna od glavnih razlika između mekih i industrijskih robota. Ako pogledamo živi svijet, ljude i životinje, tvrda konstrukcija ih sačinjava tek oko 15 % (koštani sustav), sve ostalo je meka tvar (mišići, hrskavica, koža). Meki materijali su jako dobri u skladištenju energije te prigušivanju oscilacija. Roboti konstruirani iz takvih materijala su prirodniji u njihovim pokretima i generalno lakši za primjenu. [1]

## 2.3 Konstrukcija mekih robota

Autonomni robot sastoji se od osnovne konstrukcije, senzora, upravljačke jedinice, aktuatora, izvora energije te od upravljačkog programa. Izgradnja konstrukcije mekog robota izrađuje se lijevanjem, injekcijskim prešanjem ili aditivnim tehnologijama relativno jednostavna. Senzori i mikrokontroleri su u današnjim vremenima toliko sitni da svojom tvrdoćom ne narušavaju mekoću samog robota. Najveći izazov kod konstrukcije mekog robota je odabir aktuatora i izvora energije. Klasični elektromotori nemogu se minimizirati u usporedbi sa senzorima (*SMD*, *MEMS*) s obzirom na to da se minimalizacijom gube karakteristike. Hidraulički i pneumatski pogon je korišten u nekim aplikacijama meke robotike, ali pumpe i energetska podrška znaju biti ozbiljniji problem. Meki aktuatori poput elektroaktivnih polimera (*eng. Electro-active polymers, EAP*) te materijala s mogućnošću promjene faze su puno prihvatljiviji, ali su također dosta ograničeni.

Grupa aktuatora koja ima najveću uporabu u mekoj robotici su memorijske legure (*eng. Shape Memory Alloys, SMA*). To su legure koje mijenjaju svoj oblik tijekom promjene temperature. Namatanjem legura u obliku žica u oprugu moguće je dobiti aktuatore koji mijenjaju svoju dužinu kod promjene temperature koja se stvara prolaskom električne energije kroz leguru. Opruge memorijskih legura ponašaju se kao mišići.

Izvor energije u mekoj robotici predstavlja veliki problem, prvenstveno zbog toga jer sve što je električno treba nešto za skladištenje, tj. bateriju ili kondenzator. Elektronički elementi za pohranu energije su teški i robusni. Iako postoje neki oblici fleksibilnih spremnika električne energije, nisu još u komercijalnoj upotrebi i imaju jako mali kapacitet. Također postoje i neki oblici kemijskih i organskih spremnika.

Zadnji izazov kod konstrukcije mekih robota je upravljački program. Većina poznatih metoda nije u mogućnosti kontrolirati visok stupanj stupnjeva slobode. Životinje imaju taj problem dobro riješen te bi istraživanjem ponašanja životinja u novom prostoru pridonijelo razvitku algoritma za kretanje robota u nepoznatom prostoru.

## 2.4 Podjela mekih robota

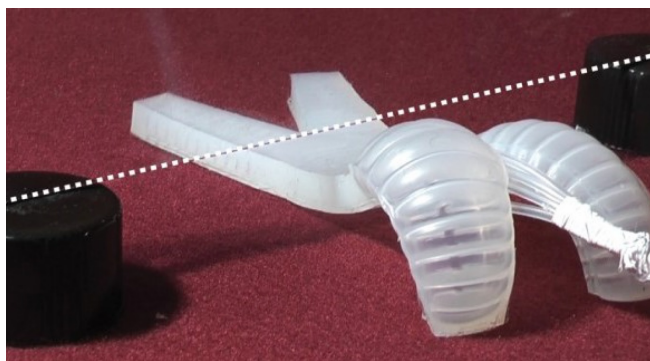
Većina robota u mekoj robotici konstruirani su po uzoru na životinje. To nisu roboti nalik velikim životinjama poput slona ili slično, već minijturni roboti nalik kukcima. Također su izgrađeni i neki roboti nalik mekušcima za rad pod vodom.



Slika 1: Pneumatski mišić

Preuzeto: 24.4.2017. Izvor: <http://mech.vub.ac.be>

Prva vrsta su roboti koji koriste tradicionalne motore i pumpe, tj. aktuatore od tvrdih materijala koji pogone meki robot uz pomoć kablova ili crijeva za fluid. Neke meke robote tako pokreću pneumatski mišići. Pneumatski mišići (*eng. Pneumatic Muscles*) su aktuatori koji su bazirani na unutarnjim šupljinama koje se pune. Unutarnje šupljine su u doticaju sa mekanim ili lako deformabilnim stijenkama [Slika 1]. Puštanjem zraka u unutarnje šupljine, stijenke se deformiraju i nastaju balončići zraka koji deformiraju mišić u smjeru manjeg otpora određenog konstrukcijom samog mišića. Pneumatski mišić moguće je regulirati protokom i tlakom zraka pri čemu se mogu dobiti različite brzine djelovanja aktuatora kao i njihova snaga djelovanja.



Slika 2: Meki robot pogonjen pneumatskim mišićima

Preuzeto: 24.4.2017. Izvor: <http://www.quantumday.com>

Jedan takav robot je prikazan na slici [Slika 2]. Robot koristi unutarnje kanale koji se popunjavaju zrakom i tako se njegova konstrukcija deformira čime se simuliraju pokreti sipe. Sličan princip korišten je i kod konstruiranja robotske ruke u obliku surle.

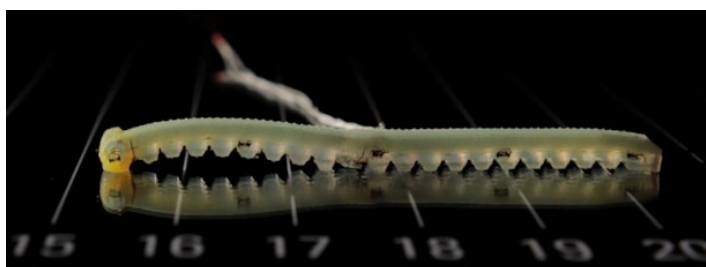
Druga grupa robota su roboti koji kao aktuatore koriste pametne materijale. Takvi roboti ne trebaju posebnih motora i skloni su potpunoj mekoj konstrukciji. Jedan od nedostataka takvih robota je slaba efektivnost aktuatora i slabo generiranje sile te kruti spremnici energije poput baterije. Neki od najkorištenijih pametnih materijala su: memorijske legure (*eng. shape memory alloy, SMA*), memorijski polimeri (*eng. shape memory polymer, SMP*), ionizirani polimerni metalni kompoziti (*eng. ionic polymer metallic composite, IPMC*), magnetno reologički fluid (*eng. magneto-rheological fluid*) i dielektrični elastomer (*eng. dielectric elastomers*). Korištenje memorijskih legura i polimera za tijelo robota omogućilo je razvitak kompliciranih pokreta i transformaciju oblika samog robota. Memorijski materijali pokazuju različito ponašanje kada se promijene uvjeti okoline u kojoj se nalaze. Primjerice kod memorijskih legura na temelju promjene temperature dolazi do promjene faze u strukturi legura iz meke strukture u snažnu čvrstu strukturu. Također, moguće je vraćanje legure u prvobitni, programirani oblik, pri čemu se generira sila.



Slika 3: The Meshworm

Preuzeto: 24.4.2017. Izvor: <http://www.nextgov.com/>

The Meshworm robot prikazan na slici [Slika 3] koristi memorijske legure za kotrakciju konstrukcije u uzastopnim dijelovima čime je omogućeno radijalno širenje te robot po tom principu mijenja položaj.



Slika 4: The GoQBot

Preuzeto: 24.4.2017. Izvor: <http://trilliumstudios.com>

*The GoQBot* konstruiran je po uzoru na gusjenicu [Slika 4]. Robot je napravljen od silikonskog polimera u kojeg su uronjene jako male opruge napravljene od memorijskih legura. Robot može jako deformirati konstrukciju i pretvoriti se u kotač. [1]

## 2.5 Primjena mekih robota

Očito je da su navedeni roboti konstruirani prvenstveno u svrhu istraživanja i da nemaju nikakvu generalnu primjenu. Nova generacija takvih robota gradi se pomoću aditivnih tehnologija koje omogućuju istovremeno printanje više različitih materijala s različitim svojstvima elastičnosti.

Prvenstvena primjena mekih robota u budućnosti bila bi istraživanje njihove konstrukcije, kako je smanjiti i promijeniti kako bi se mogli primijeniti na teško dostupnim mjestima, penjanju, traženju mehaničkih kvarova električnih mreža i slično. Bit će moguće slati robote u vatrogasnim akcijama da traže preživjele, a da ih ne ozlijede. Također, meke robote je moguće izgraditi iz biomaterijala koji mogu ući u ljudski organizam kao instrumenti dijagnostike ili pomagala kod operacija. Jedna od mogućih primjena mekih robota je i u razminiravanju minskih polja, gdje zbog svoje mekane konstrukcije imaju manji mogućnost aktiviranja zakopanih mina.

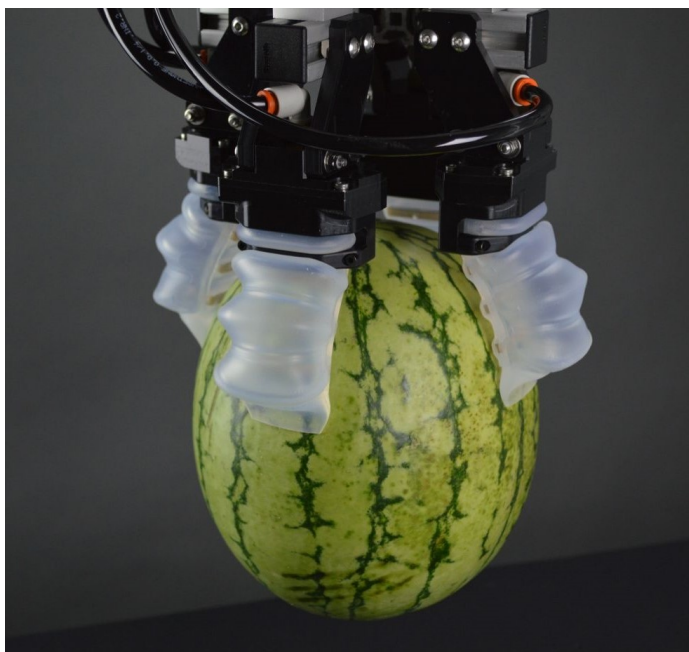


Slika 5: Robotska hvataljka napravljena od kave

Preuzeto: 24.4.2017. Izvor: <http://www.hizook.com>

Današnja primjena mekih robota u realnim aplikacijama prepoznatljiva je u konstrukciji robotskih hvataljki u prehrambenoj industriji i poljoprivredi gdje robot hvatanjem nesmiye oštetiti objekt koji hvata [Slika 6]. Mekom hvataljkom robot može uhvatiti objekt bez regulacije sile, što je puno jeftinije od ugradnje senzora sile.



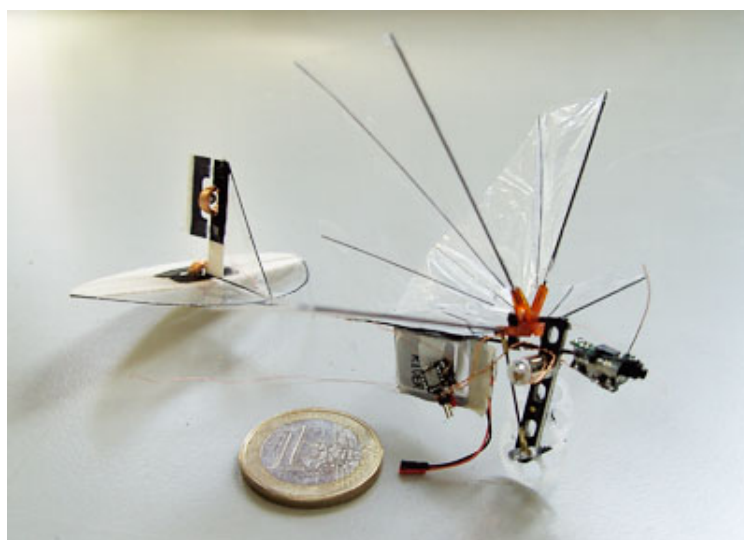


Slika 6: Robotska hvataljka s pneumatskim mišićima

*Preuzeto: 24.4.2017. Izvor: <https://www.prlog.org>*

## 2.6 Razvoj mekih robota u budućnosti

Vrlo vjerojatno je da će se aspekt novih robota oslanjati na primjere iz prirode te kako iz živućeg i postojećeg organizma napraviti stroj. Područje koje se bavi tim pitanjem je biomimetika.



Slika 7: DelFly

*Preuzeto: 24.4.2017. Izvor: <https://en.wikipedia.org>*

Danas se pojam biomimetike može definirati kao sakupljanje dobrih konstrukcijskih rješenja iz prirode. Priroda je stvorila konstrukcije i materijale zapanjujuće funkcionalnosti, heterogenosti i stabilnosti. Rezultirajući roboti sve više poprimaju obilježja životinja, koriste inteligenciju i pokretljivost preuzetu iz prirode. Iako današnji roboti imaju malo sličnosti s životinjama, u nekim aspektima veza između robotike i biologije je vrlo bitna. Koncept oponašanja životinja nije nov, ljudi već stotinama godina traže način kako da oponašaju prirodu.

Jedan od početnih neuspjelih pokušaja oponašanja leta po uzoru na šišmiševa krila je i Leonardo da Vincijev leteći stroj. Leonardo se također bavio i humanoidnim robotima iako se ne može potvrditi da je i jedan ikada izrađen. Robot je bio zamišljen da može sjediti, mahati rukama i micati glavom. Poznati inženjer Alexandar Gustav Eiffel je konstruirao poznati Effileov toranj po uzoru na strukturu kosti ljudskog kuka [Slika 8]. Postoji još čitav niz primjera u povijesti kako je čovjek tražio tehnička rješenja u prirodi. Značajan razvoj robotike dogodio se u drugoj polovici dvadesetog stoljeća.



Slika 8: Struktura Effileovog tornja

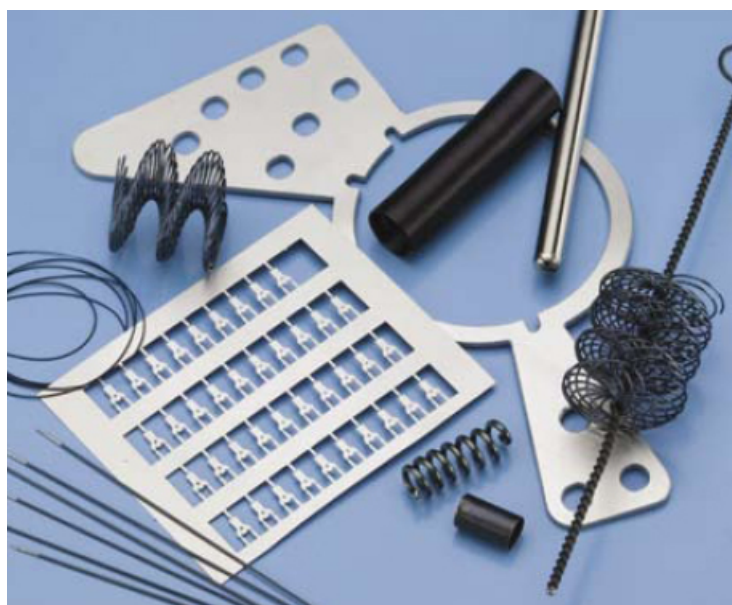
*Preuzeto: 25.4.2017. Izvor: <http://www.yaratilishakikatleri.com>*

### 3 Memorijske legure

Postoje dva načina kojima se pomoću električne energije može generirati pokret. To su elektromotori i elektromagneti. Elektromotori koriste zavojnice bakrenih žica u statoru preko kojih se generira magnetski tok koji uzrokuje rotaciju rotora. Nalazimo ih u industrijskim strojevima kao i u najjednostavnijim kućanskim i hoby alatima, različitim medijskim uređajima te dječjim igračkama. Elektromagneti su metali koji su omotani žicom koja generira magnetsko polje. Magnetsko polje stvara push (gurnuti) ili pull (povući) efekt. Najpoznatiji primjer je zvučnik ili slušalice. Također se koristi u električnim sustavima za zaključavanje. Jedan od novijih primjena elektromagneta su piezoelektrični materijali koji mogu generirati male i snažne vibracije. Uz elektromotore i elektromagnete pojavio se poprilično nov način postizanja pokreta iz električne energije, a to su memorijske legure.

#### 3.1 Uvodno o memorijskim legurama

Memorijske legure (eng. Shape Memory Alloys, SMA) [Slika 9] su legure koje pamte svoj originalni oblik. Legura se može deformirati te se njenim zagrijavanjem uz generiranje sil, vraća u originalni oblik. Memorijske legure su poznate i pod nazivima pametni metali (eng. Smart Metal, SM) te mišićne žice (eng. Muscle Wire, MW).



Slika 9: Memorijske legure

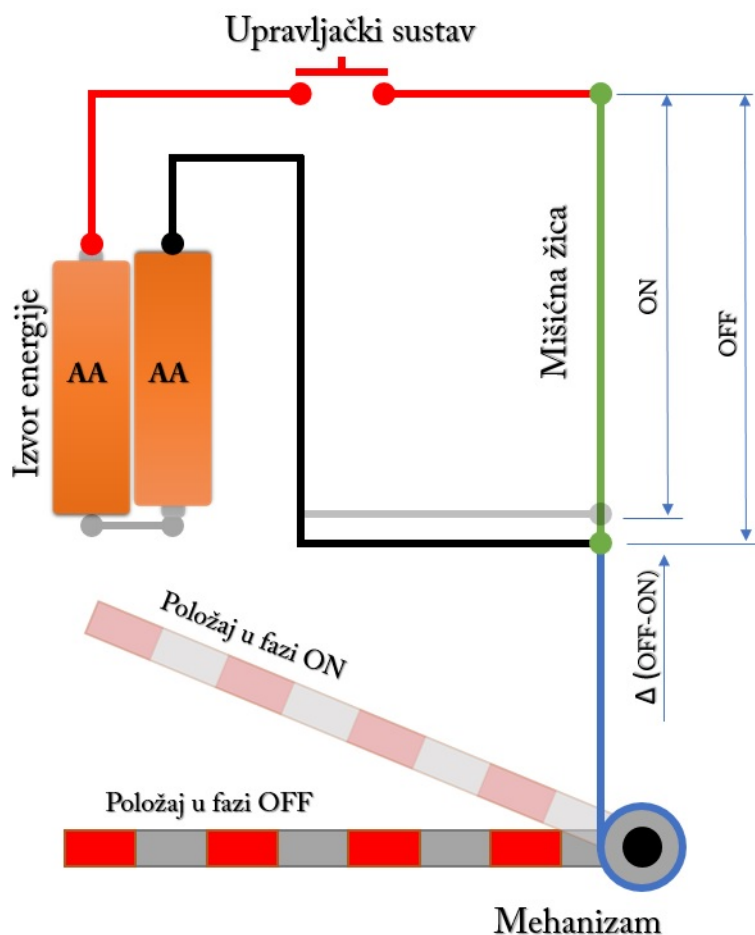
Preuzeto: 24.4.2017. Izvor: <http://todaysmachiningworld.com>

Memorijske legure generiraju relativno jako veliku silu. Sila koja je generirana može povući i više od 100 puta veću masu od same legure. Zagrijavanje legure može se generirati

direktno sa električnom energijom te se taj princip može koristiti za generiranje različitih pokreta koji mogu biti brzi i jako precizni. Memorijske legure koriste se u uređajima koje je teško ili nemoguće pogoniti sa elektromotorima i elektromagnetima. Postoje u različitim oblicima kao što su žice, opruge, ploče, mreže i slično.

### 3.2 Osnovni strujni krug memorijskih legura

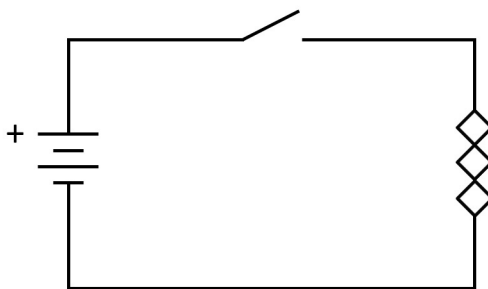
Uređaj prikazan na slici [Slika 10] je jednostavan primjer koji pokazuje način rada memorijskih legura. Uređaj se sastoji od izvora energije, jedne memorijske legure u obliku žice (mišićna žica) te prekidačke sklopke. Kada se mehanizam upali mišićna žica se kontrahira, generira silu i djeluje kao dizalica koja podiže masu.



Slika 10: Osnovni strujni krug memorijskih legura

- **IZVOR ENERGIJE** - generira energiju koja je potrebna za zagrijavanje mišićne žice. U ovom primjeru su to dvije AA baterije koje zajedno stvaraju razliku potencijala od 3 V.
- **UPRAVLJAČKI SUSTAV** - omogućuje pali-gasi kontrolu (eng. on-off control) koja upravlja mišićnom žicom. U ovom primjeru kontrola sustava je prst operatora.

- **SUSTAV ZAŠTITE** - dio električnog sustava koji ograničava struju i napon mišićne žice te štiti ju od pregrijavanja. U ovom primjeru, baterije su projektirane po duljini i promjeru mišićne žice te posjeduju unutranji otpor koji ograničava maksimalnu vrijednost izlazne struje.
- **MIŠIĆNA ŽICA** - generira silu, a kontrolu nad njom osiguravaju navedeni sustavi.
- **MEHANIZAM** - uključuje polugu, bazni dio i dijelove na koji se pričvršuje mišićna žica. Mehanizam također štiti mišićnu žicu od pretezanja i ostalih sila koji ju mogu oštetiti.



Slika 11: Osnovni shematski stujni krug memorijskih legura

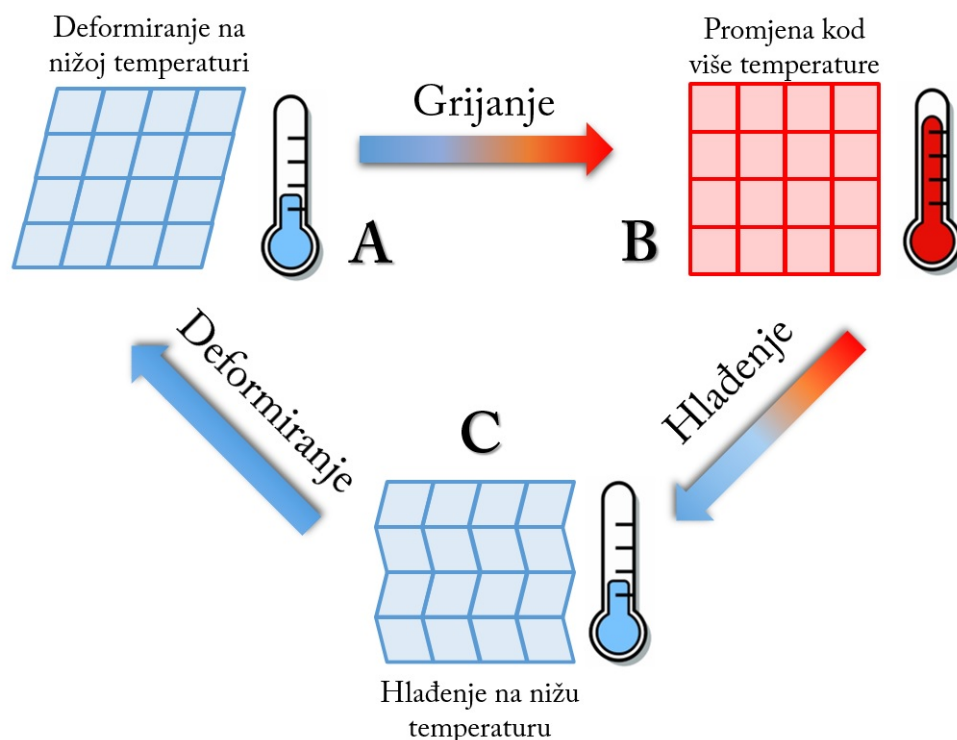
Prikazani primjer pokazuje kako se mišićna žica skraćuje kada kroz nju teče električna energija te preko mehanizma odrađuje rad i podiže uteg. Mišićna žica se zagrijava pomoću električne energije od 3V i 200 mA te na dužini od 10 centimetara stvara kontrakciju od nekoliko posto, što je u krajnjem slučaju kontrakcija od 4 milimetara. Mala deformacija preko poluge stvara relativno veliku silu i pomak. Kada mišićna žica nije priključena na električnu energiju, ona se hladi i relaksira u početni oblik iz kojeg opet može ponoviti i stvoriti isti efekt.

### 3.3 Funkcioniranje memorijskih legura

Memorijske legure spadaju u skupinu metala koji pokazuju efekt pamćenja oblika (*eng. Shape Memory Effekt, SME*). Takve legure posjeduju kristalnu rešetku koja se mijenja u ovisnosti o temperaturi. Kada je legura u prijelazu temperature, može deformirati bez da se rešetka ošteti ili mijenja kako je slučaj kod drugih legura. Nakon što je memorijska legura deformirana i ponovno grijana, legura se oporavlja i vraća u početni oblik. Grijanje je moguće na dva načina: provođenjem električne energije kroz leguru ili grijanje vanjskim izvorom energije.

Mreže predstavljaju tipičnu kristalnu strukturu memorijskih legura gdje je svaki kvadrat skupina specifičnih komponenti metala [Slika 12]. U tempertauri A se legura jednostavno deformira. Kristalna rešetka mijenja fazu i vraća se u početni oblik kad nastupi

dovoljno velika promjena temperature B. Promjena se događa uz generiranje sile koja je do sedam puta veća od one koja je potrebna da se legura deformira (A). Kada nastupi hlađenje, legura se vraća u oblik C, iz kojeg se može ponovo lako deformirati.



Slika 12: Mehanizam pamćenja obika

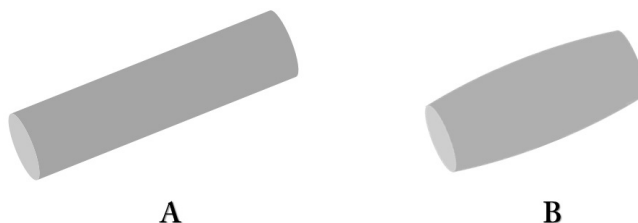
Pametne legure koje se sastoje od titana i nikla poznate su pod imenom Nitinol. Ta dva elementa su prisutna u približno jednakim omjerima. Nitinol posjeduje mogućnost pamćenja oblika što omogućuje njenu deformaciju na jednoj temperaturi i oporavak u izvorni oblik na drugoj temperaturi. Memorija oblika temelji se na reverzibilnoj faznoj transformaciji poznatoj pod imenom martenzitna transformacija koja se temelji na preuređenju strukture atoma titana i nikla. Na visokim temperaturama memorijska legura ima strukturu austenita koja je kristalna. Na niskim temperaturama rešetka se spontano preuređuje u monoklinsku strukturu koja se naziva martenzit. Na sobnoj temperaturi legura ima martenzitnu strukturnu rešetku, no kada je struktura podvrgnuta grijanju, počinje se formirati austenitna struktura i time se legura vraća u originalni oblik. Za izradu Nitinol žice, faza koja pamti oblik je austenitna faza.

Memorijske legure se izrađuju od mnogo različitih kombinacija elemenata metala. Temperaturne promjene ovise o različitim kombinacijama te se na takav način može precizno utjecati na nju. Jedna od najpoznatijih memorijskih legura je Nitinol koja se sastoji od praktički jednakih omjera nikla i titana. Promjena omjera nikla i titana za svega nekoliko posto mijenja temperaturu prijelaza u rasponu od  $-100$  do  $+100$  °C. Legure za svakodnevnu uporabu na sobnoj temperaturi (oko 20 °C) imaju temperaturu prijelaza



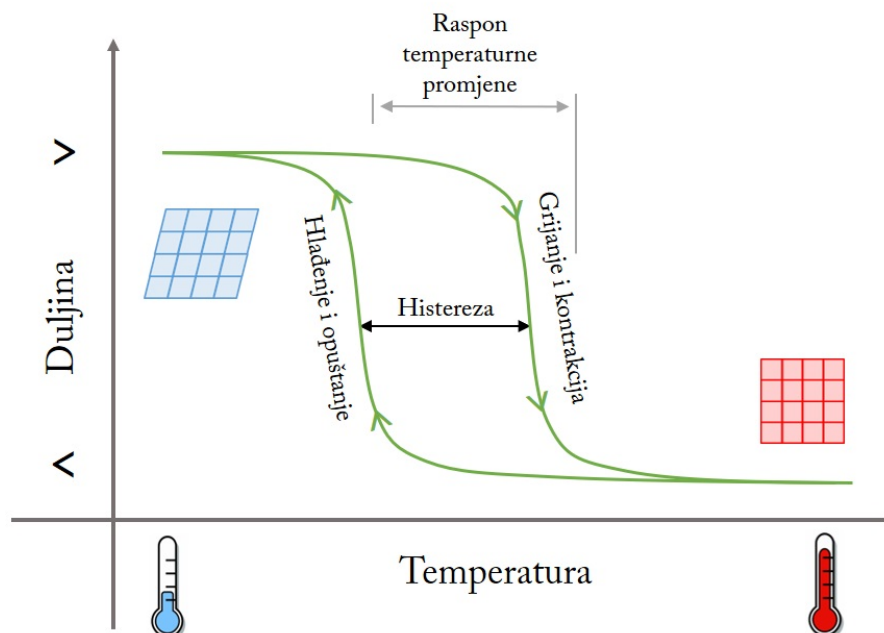
za 70 do 90 °C. Legure s visokim temperaturama prijelaza mogu mijenjati fazu grijanja puno brže nego što se hlade na sobnoj temperaturi, ali im je za to potrebno puno više energije. Legure s niskim temperaturama prijelaza, ispod sobne temperature, generalno treba hladiti, budući da su na sobnoj temperaturi uvijek aktivne.

Memorijske legure kod grijanja povećavaju svoj poprečni presjek što uzrokuje smanjenje po duljini [Slika 13]. U slučaju memorijske legure u obliku žice, povećava se njezin presjek, što uzrokuje kontrakciju po dužini. Žica tada prelazi u bačvasti oblik.



Slika 13: Kontrakcija mišićnih žica

U prijelazu memorijskih legura iz sobne u radnu temperaturu javlja se histereza gdje je temperatura aktiviranja veća od temperature u kojoj se legura može ponovo deformirati.



Slika 14: Temperaturna histereza memorijskih legura

Graf pokazuje kako se memorijska legura ponaša pod utjecajem konstantne sile, promjenu duljine u ovisnosti o temperaturi [Slika 14]. Tipična legura se deformira u nižoj temperaturi od one u kojoj se kontrahira. Ta promjena stvara histerezu ili područje u kojoj legura može biti kontrahirana ili deformirana, ovisno o početnom stanju.

### 3.4 Metali za izradu memorijskih legura

Memorijske legure se većinom izrađuju od metala i pojedinih polumetala u kombinacijama. Omjer pojedinih metala u leguri može bitno promijeniti svojstva samih legura što je posebno izraženo kod temperature promjene. Metalne legure dolaze u sljedećim kombinacijama: zlato-kadmij (Au - Cd), srebro - kadmij (Ag - Cd), bakar - aluminij - nikal (Cu - Al - Ni), bakar-olovo (Cu - Sn), bakar - cink (Cu-Zn), bakar - cink - aluminij (Cu-Zn-Al), indij - titan (In-Ti), indij - talij (In-Tl), željezo - platina (Fe - Pt), nikal - aluminij (Ni - Al), željezo - magnezij - silicij (Fe - Mn - Si), magnezij - bakar (Mn - Cu), te najpoznatiji nikal - titan (Ni - Ti).

hydrogen 1 H 1.0079																		helium 2 He 4.0026																	
lithium 3 Li 6.941		beryllium 4 Be 9.0122																		neon 10 Ne 20.180															
sodium 11 Na 22.990		magnesium 12 Mg 24.305																		argon 18 Ar 39.948															
potassium 19 K 39.098		calcium 20 Ca 40.078		scandium 21 Sc 44.956		titanium 22 Ti 47.867		vanadium 23 V 50.942		chromium 24 Cr 51.996		manganese 25 Mn 54.938		iron 26 Fe 55.845		cobalt 27 Co 58.933		nickel 28 Ni 58.693		copper 29 Cu 63.546		zinc 30 Zn 65.39		gallium 31 Ga 69.723		germanium 32 Ge 72.61		arsenic 33 As 74.922		selenium 34 Se 78.96		bromine 35 Br 79.904		krypton 36 Kr 83.80	
rubidium 37 Rb 85.468		strontium 38 Sr 87.62		yttrium 39 Y 88.906		zirconium 40 Zr 91.224		niobium 41 Nb 92.906		molybdenum 42 Mo 95.94		technetium 43 Tc [98]		ruthenium 44 Ru 101.07		rhodium 45 Rh 102.91		palladium 46 Pd 106.42		silver 47 Ag 107.87		cadmium 48 Cd 112.41		indium 49 In 114.82		tin 50 Sn 118.71		antimony 51 Sb 121.76		tellurium 52 Te 127.60		iodine 53 I 126.90		xenon 54 Xe 131.29	
caesium 55 Cs 132.91		barium 56 Ba 137.33		57-70 * Lu 174.97		hafnium 72 Hf 178.49		tantalum 73 Ta 180.95		tungsten 74 W 183.84		rhenium 75 Re 186.21		osmium 76 Os 190.23		iridium 77 Ir 192.22		platinum 78 Pt 195.08		gold 79 Au 196.97		mercury 80 Hg 200.59		thallium 81 Tl 204.38		lead 82 Pb 207.2		bismuth 83 Bi 208.98		polonium 84 Po [209]		astatine 85 At [210]		radon 86 Rn [222]	
francium 87 Fr [223]		radium 88 Ra [226]		89-102 * * La [262]		actinium 89 Ac [227]		thorium 90 Th 232.04		protactinium 91 Pa 231.04		uranium 92 U 238.03		neptunium 93 Np [237]		plutonium 94 Pu [244]		americium 95 Am [243]		curium 96 Cm [247]		berkelium 97 Bk [247]		californium 98 Cf [251]		einsteinium 99 Es [252]		fermium 100 Fm [257]		mendelevium 101 Md [258]		nobelium 102 No [259]		oganesson 118 Og [294]	

lanthanum 57 La 138.91		cerium 58 Ce 140.12		praseodymium 59 Pr 140.91		neodymium 60 Nd 144.24		promethium 61 Pm [145]		samarium 62 Sm 150.36		europium 63 Eu 151.96		gadolinium 64 Gd 157.25		terbium 65 Tb 158.93		dysprosium 66 Dy 162.50		holmium 67 Ho 164.93		erbium 68 Er 167.26		thulium 69 Tm 168.93		ytterbium 70 Yb 173.04	
actinium 89 Ac [227]		thorium 90 Th 232.04		protactinium 91 Pa 231.04		uranium 92 U 238.03		neptunium 93 Np [237]		plutonium 94 Pu [244]		americium 95 Am [243]		curium 96 Cm [247]		berkelium 97 Bk [247]		californium 98 Cf [251]		einsteinium 99 Es [252]		fermium 100 Fm [257]		mendelevium 101 Md [258]		nobelium 102 No [259]	

Slika 15: Metali za izradu memorijskih legura

### 3.5 Povijest metalnih legura

Memorijske legure izumljene su 1932. godine u Švedskoj. Izumio ih je Arne Olander koji je proučavao kontrakciju oblika legure zlato - kadmij (Au - Cd). 1950. godine na američkom sveučilištu Columbia University, koristeći x-zrake, definirana je kristalna rešetka legura i objašnjena njihova promjena. Također je prikazano da mehanički sustav pogonjen takvim legurama može obaviti rad.



Indij i zlato bili su poprilično problematični, prvenstveno zbog same cijene. Također, prvi metali koji su se koristili, u prirodi su bili toksični, pa su stoga bili teški za primjenu. Te činjenice su dovele do istraživanja netoksičnih i nekorodirajućih elemenata. Tako je sredinom šezdesetih godina nastala legura nikla i titana koja je nazvana Nitinol. Nitinol je omogućio nova istraživanja, posebno kristalne rešetke. Nitinol je netoksičan, puno jeftiniji od zlata i indija te ima puno izraženiju promjenu deformacija - relaksacija nego ostale legure iz skupine memorijskih legura.

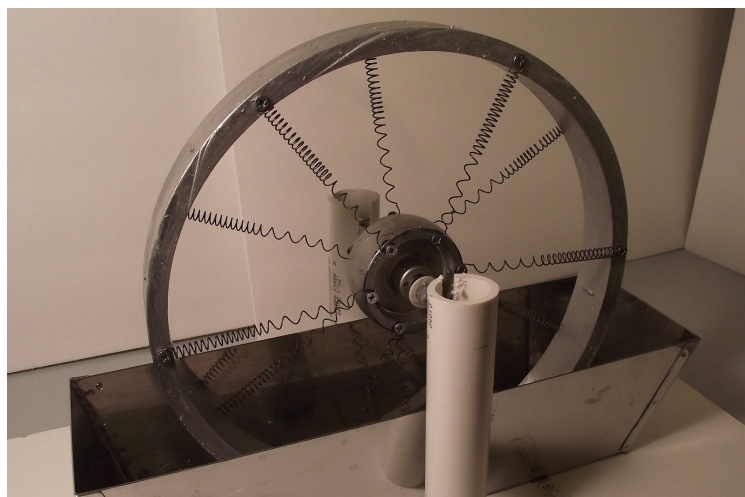
Daljnja istraživanja početkom sedamdesetih godina pronašla su memorijski efekt i u drugim legurama: bakar - aluminij - nikal (Cu - Al - Ni), bakar - olovo (Cu - Sn), bakar - cink (Cu-Zn), bakar - cink - aluminij (Cu-Zn-Al), indij - titan (In-Ti), indij - talij (In-Tl), željezo - platina (Fe - Pt), nikal - aluminij (Ni - Al). Navedeni elementi su relativno slični te u legurama imaju identičnu kristalnu rešetku. Najpoznatije i najkorištenije današnje memorijske legure su nikal - titan te bakar - cink - aluminij. Navedene legure su jeftine i pokazuju mogućnost velike promjene oblika uz generiranje relativno velike sile. [2]

### 3.6 Primjena metalnih legura

Tijekom istraživanja legura u prošlom stoljeću, u glavnu granu istraživanja također je spadalo i pronalazak praktičnih primjena. NASA je memorijske legure istraživala za satelitske antene koji bi ekspandirale kad bi se približale Suncu. Osim svemirske tehnologije, memorijske legure su korištene u motorima koje pokreće topla i hladna voda, automatskim toplinskim sklopkama i sličnim primjenama kod koji je prisutna promjena temperature. Mnoge primjene nisu zaživjele budući da su memorijske legure preskape i preograničene za određene primjene. Razvojem tehnologije, razvijale su se i memorijske legure koje su danas našle primjenu prvenstveno u medicini, posebno Nitinol koji kod ugradnje u organizam pokazuje malu mogućnost odbacivanja od strane organizma.

1971. godine napravljeno je umjetno srce koristeći memorijske legure. No, izrađeno srce je dalo je tek 15 otkucaja u minuti što je pet puta sporije od normalnog rada srca. Druga istraživanja u medicini našla su primjenu u zubotehničarstvu i implantima za vene koje se ugrađuju na nižoj temperaturi, a na temperaturi organizma se deromiraju i postižu željenu veličinu.

Jedna od zanimljivijih primjena memorijskih legura je motor pogonjen Nitinol oprugama [Slika 16]. Ideja motora je bila da ga pogoni topla voda koja izlazi iz industrijskih pogona. Takva voda nakon parnih kotlova više nema primjenu, osim hlađenja i vraćanja u pogon. No, ostatak topline u vodi, može grijati nitinol opruge koje pokreću kotač. Rotiranje takvog kotača može se iskoristiti kao pogon. Takav motor može postići do 1000 okretaja u minuti i može generirati i do 30 W energije.



Slika 16: Kotač pogonjen Nitinol oprugama (eng. Heat Motor)

*Preuzeto: 24.4.2017. Izvor: [www.youtube.com](http://www.youtube.com)*

Novija istraživanja zahtijelava su i bolje materijale. Jedna od novijih memorijskih legura nazvana je Flexinol. Radi se o žicama određenog promjera koja se kod promjene temperature kontrahira, tj. smanjuje duljinu za 3 - 5 %. Primjenjuje se u mehanizmima u kojima je potrebna kontrakcija. Jedna od glavnih primjena je simuliranje rada ljudskih mišića pa se često primjenjuje u izradi čovjekolikih robotskih ruka s više prstiju [Slika 17].



Slika 17: Robotska ruka s mišićnim žicama

*Preuzeto: 24.4.2017. Izvor: <https://www.pinterest.com>*

Ako se mišićne žice paralelno stave u rad, sila koja se može generirati se povećava s brojem žica. Novija istraživanja su pokazala da takvi sustavi žica mogu generirati velike sile i time obaviti ogromne radove [Tablica 1].

Tablica 1: Podaci sila za paralelan rad mišićnih žica [2]

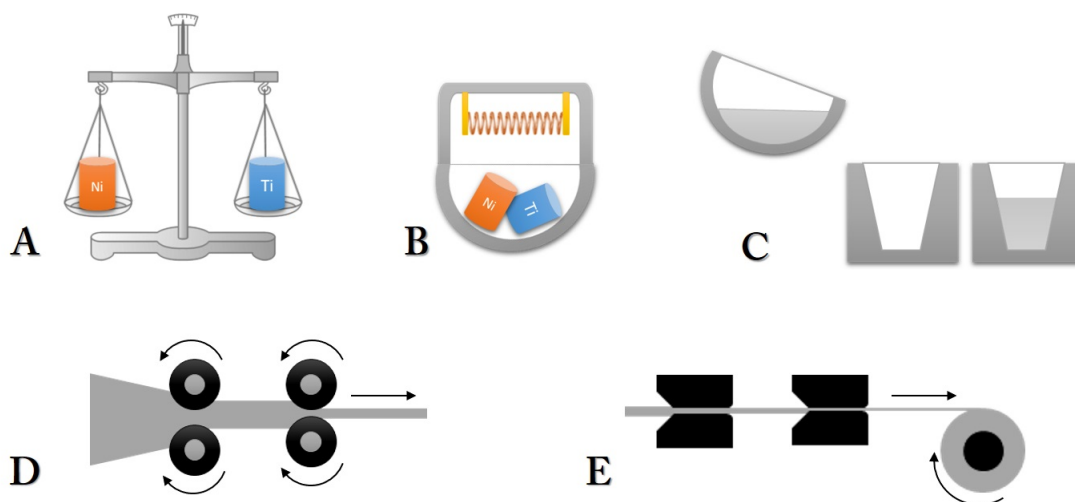
Promjer žice [ $\mu\text{m}$ ]	Duljina žice [cm]	Generirana sila [N]	Svladana masa [kg]	Snaga [W]
50	10	3.43	0.35	1
	50	17.2	1.75	6
	100	34.3	3.50	13
	250	85.8	8.75	32
100	10	14.7	1.5	5
	50	73.5	7.5	24
	100	147.0	15.0	49
	250	367.5	37.5	122
150	10	32.3	3.3	8
	50	161.7	16.5	40
	100	323.4	33.0	80
	250	808.5	82.5	200
250	10	91.1	9.3	20
	50	455.7	46.5	100
	100	911.4	93.0	200
	250	2278.5	232.5	500

## 4 Implementacija memorijskih legura

### 4.1 Proizvodnja memorijskih legura

Među najpoznatijim memorijskim legurama su Flexinol i Nitinol. Flexinol je legura koja se prijelazom na više temperature steže i generira silu, za razliku od Nitinola koji ima mogućnost pamćenja oblika. Legura Nitinol, također je jako zanimljiva iz aspekta kemijskog sastava. Naime, nikal i titan koji sačinjavaju ovu leguru, dolaze u jednakim masenim udjelima. Nejednolik maseni udjel bitno utječe na temperaturu prijelaza. No, na temperaturu prijelaza utječu i nečistoće kao što su kisik i željezo koji temperaturu prijelaza mogu promijeniti čak i za 200 °C, stoga proizvodnja memorijskih legura zahtijeva točnu formulaciju i proces.

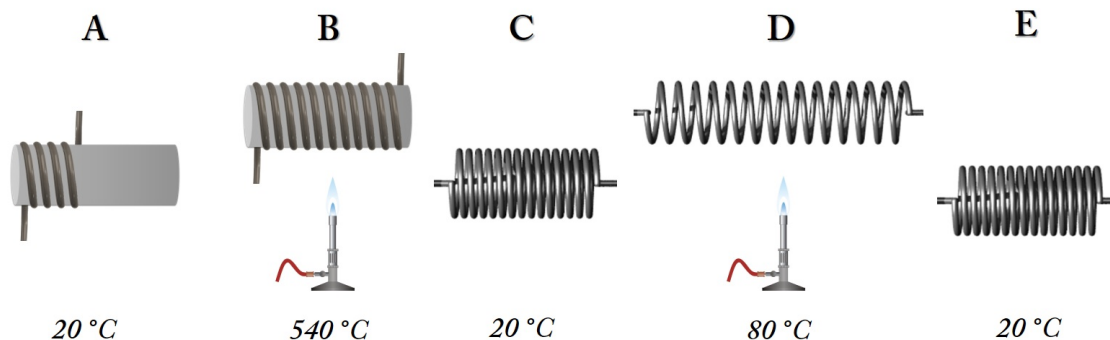
Vrlo važan dio procesa proizvodnje [Slika 18] je mjerenje masenog udjela komponenti (A) koje se miješaju i griju u vakumskoj peći na 1300 °C (B). Rastopljena legura se lijeva u ingot kalupima (C) nakon čega se odljevak valja u poluproizvode (D) te izvlači u žice ili drugi konačni oblik (E). Žice su najpopularnije među istraživačima budući da je sa žicama jednostavno baratati i mogu se aktivirati uz pomoć električne energije. No, memorijske legure postoje i u obliku limova, folija i sličnih proizvoda. Legure u obliku žica i ostalih poluproduktova mogu se preraditi u željeni proizvod kao što je opruga. Jedna od jako čestih primjena memorijskih legura je baš u obliku opruga.



Slika 18: Proizvodnja memorijskih legura

U obliku opruga najčešće dolazi Nitinol koji u obliku opruge može postizati jako velike kontrakcije, čak do 40%. Uz kontrakciju generira se i sila, a aktivacija kontrakcije može se postići i električnom energijom. Nitinol je skup i težak za naknadnu obradu, budući da je njegova tvrdoća veća od svakodnevnih čeličnih legura. Nitinol [Slika 19] se

tako u željeni oblik deformira na nižim temperaturama (A) i zagrijava na temperaturu od  $540^{\circ}\text{C}$  (B). Ta temperatura je dovoljan da Nitinol zapamti oblik u kojem se nalazi. Kad se ohladi na sobnu temperaturu (C), moguće ga je preoblikovati u neki drugi oblik (D) te se naknadnim zagrijavanjem na temperaturu prijelaza vraća u početni oblik (E).



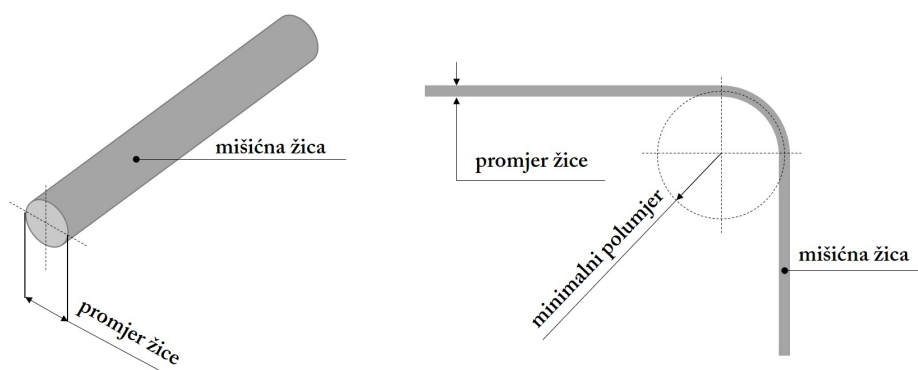
Slika 19: Izrada Nitinol opruga

## 4.2 Fizičke karakteristike mišićnih žica

### 4.2.1 Promjer

Jako malene žice su mjerene u mikrometrima ( $\mu\text{m}$  - tisućiti dio milimetra). Tipični promjer ljudske kose je od 25 do  $100 \mu\text{m}$ . Mišićne žice nalaze se u rasponu od 25 do  $375 \mu\text{m}$ . Promjer žice direktno utječe na mnogo karakteristika; unutarnji otpor po duljini žice, silu potrebnu za deformaciju u hladnom stanju, generiranu silu tijekom zagrijavanja, maksimalnu silu koju žica može izdržati prije oštećivanja, brzinu hlađenja (tanje žice se brže hlade) te maksimalni polumjer savijanja.

### 4.2.2 Polumjer savijanja



Slika 20: Minimalni polumjer savijanja

Minimalni polumjer savijanja [Slika 20] je polumjer kod kojeg mišićna žica neće biti oštećena kod progibanja. Osnovno pravilo savijanja žice je da polumjer savijanja nije manji od promjera žice uvećanog 50 puta. Primjerice, žica od 100  $\mu\text{m}$  ne smije se savijati na polumjer manji od 5000  $\mu\text{m}$  što iznosi 5 mm [Tablica 2].

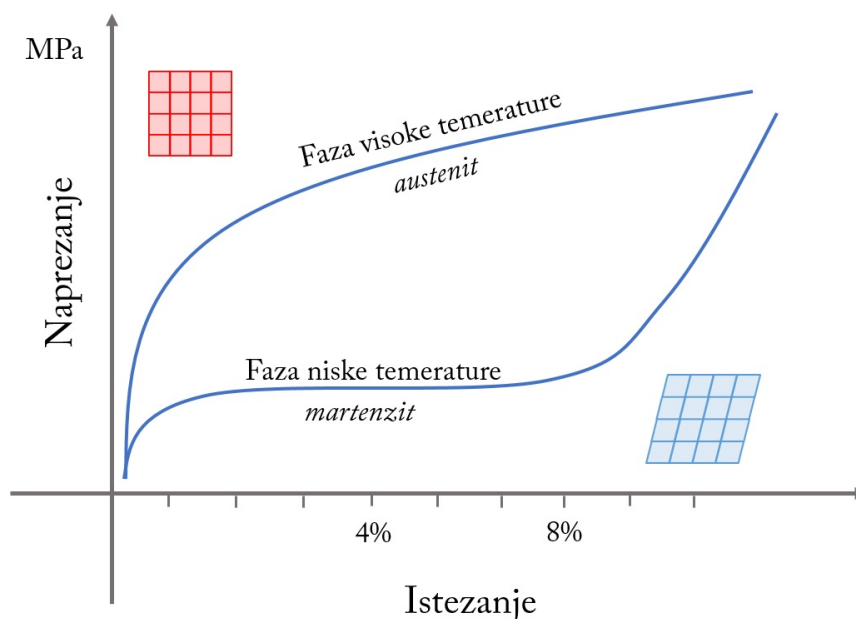
Tablica 2: Minimalni polumjer savijanja [2]

Promjer žice [ $\mu\text{m}$ ]	Minimalni polumjer [mm]
25	1.25
37	1.85
50	2.50
75	3.75
100	5.00
125	6.25
152	7.50
200	10.00
250	12.50
300	15.00
375	18.75

#### 4.2.3 Sile

Mišićne žice generiraju sile koje su fizički gledano male, ali ako se u obzir uzme volumen žice i sila koju ona generira, možemo reći da mišićne žice generiraju relativno veliku silu. Graf naprezanja i istezanja [Slika 21] pokazuje da se sile odosno naprezanja u različitim fazama bitno razlikuju. Za lakše razumijevanje i primjenu mišićnih žica, potrebno je baratati sa sljedećim pojmovima:

- **Maksimalna sila oporavka** (eng. *Maximum Recovery Force*) - maksimalna sila koju žica generira tijekom grijanja. Za Nitinol ona iznosi 600 Mpa.
- **Preporučena sila oporavka** (eng. *Recommended Recovery Force*) - sila koja je dovoljna da se žica u hladnom stanju deformira u željeni oblik. Ona obično iznosi 5 do 10 % maksimalne sile oporavka.
- **Preporučena sila deformacije u hladnom stanju** (eng. *Recommended Bias Force*) - sila koja je potrebna za deformaciju i oblikovanje mišićne žice u hladnom stanju (martenzitna struktura). Obično iznosi oko desetinu maksimalne sile oporavka što je 30 do 60 MPa. [2]



Slika 21: Graf naprezanje - istezanje

Uvjeti uspoređuju deformiranu (ohlađenu) i kontrahiranu (zagrijanu) duljinu mišićnih žica te daju prikaz koliko gibanja je moguće očekivati. Pojmovi vezani uz uvjete vraćanja:

- **Maksimum oporavka** (eng. *Maximum Recovery Ratio / Recovery Strain*) - postotak maksimalnog oporavka koji se može očekivati od mišićne žice (oko 8 % za Nitinol). Većina mišićnih žica maksimalni oporavak može izdržati samo nekoliko ciklusa.
- **Preporučeni oporavak** (eng. *Recommended Recovery Ratio*) - postotak preporučenog oporavka za maksimalni životni vijek mišićne žice (3 do 5 % za Nitinol)
- **Čvrstoća loma** (eng. *Breaking Strength*) - naprezanje kod kojeg neće doći do oštećivanja mišićne žice. Ovisi o promjeru, masenim udjelima i temperaturi mišićne žice. Za Nitinol, maksimalno naprezanje iznosi oko 1000 Mpa, uz deformaciju od 15 do 30 %
- **Superelastičnost** (eng. *Superelasticity*) - svojstvo memorijskih legura koje omogućava deformacije i naprezanja na visokim temperaturama bez oštećivanja kristalne rešetke (kod većine metalnih legura to nije moguće).
- **Youngov modul elastičnosti** (eng. *Young's Modulus*) - za većinu materijala je konstantan. Za memorijske legure, Youngov modul elastičnosti varira sa temperaturom, masenim udjelom i istezanjem. Za Nitinol, Youngov modul elastičnosti u martenzitno fazi iznosi 28 GPa (poput olova) dok u austenitnoj fazi iznosi 75 GPa (poput aluminija).

- **Poissonov faktor** (eng. *Poisson's ratio*) - također ovisi o temperaturi, masenim udjelima i istezanju kao Youngov modul elastičnosti. Poissonov faktor za Nitinol iznosi 0.33 (kao aluminij).
- **Magnetička svojstva** (eng. *Magnetic Fields*) - iako kroz opruge načinjenih od mišićnih žica teče električna energija, memorijske legure su u praksi nemagnetički materijali. Kod nekih legura se može pojaviti malo magnetsko polje, ali je potpuno zanemarivo. [2]

#### 4.2.4 Električna svojstva

Napon, jačina struje i unutarnji otpor su veličine koje u mišićnim žicama slijede osnovni električni zakon, Ohmov zakon. Ako se zna unutarnji otpor žice, koji varira proporcionalno sa duljinom žice, i preporučena jačina struje, može se jednostavno izračunati preporučenini napon prema Ohmovom zakonu.

$$U = I \cdot R \quad (1)$$

Naprimjer, žica duljine 10 centimetara, sa unutarnjim otporom od  $0.5 \Omega/\text{cm}$  ima  $5 \Omega$  ukupnog otpora. Sa preporučenom jačinom struje od 400 mA, koristeći Ohmov zakon, dobivamo odgovarajući napon.

$$U = 0.400 \cdot 5 = 2 \text{ V} \quad (2)$$

Povećavanjem duljine žice, raste i unutarnji otpor, čime se povećava i potrebna snaga. Snaga, ili ukupna potrebna energija potrebna za mišićnu žicu, može se izračunati iz sljedećih jednadžbi.

$$P = I \cdot U \quad (3)$$

$$P = I^2 \cdot R \quad (4)$$

Za navedeni primjer potrebna snaga iznosi:

$$W = I \cdot U = 0.400 \cdot 2 = 0.800 \text{ W} \quad (5)$$

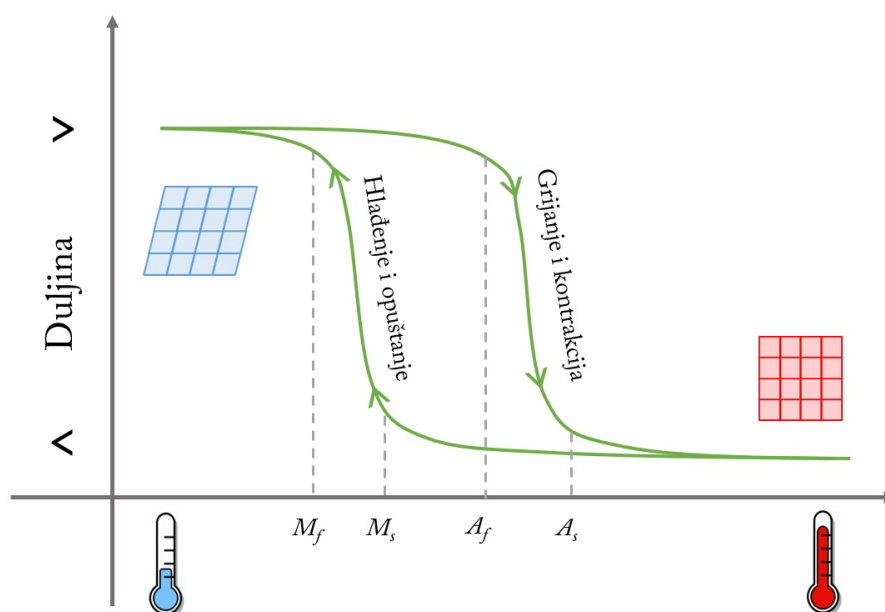
- **Volumenski otpor** (eng. *Bulk Resistivity*) - pokazuje otpor materijala električnoj energiji bez obzira na oblik. Za Nitinol iznosi oko  $70 \mu\Omega\text{cm}$  u martenzitnoj fazi te 90 u astenitnoj fazi.
- **Unutarnji otpor** (eng. *Linear Resistance*) - pokazuje otpor materijala električnoj energiji kada je materijal u obliku žice. Otpor Nitinola u obliku žice određuje promjer žice i volumenski otpor. Tanje žice imaju veći unutarnji otpor nego veće žice.



- **Preporučena jačina struje** (eng. *Recommended Current Level*) - za većinu mišićnih žica postoji tipična jačina struje koja ju aktivira, ali ju ne zagrije bitno više od sobne temperature. Ta struja je dobra za testiranje novih uređaja kao početna točka. No, struja za pokretanje uređaja se ponekad mora povećati kod čega treba biti pažljiv da se mišićna žica ne ošteti. [2]

#### 4.2.5 Temperaturna svojstva

Kada se kroz mišićnu žicu pusti električna energija, unutarnji otpor oslobađa energiju u obliku topline koja grije žicu. Ako se oslobađa dovoljno topline, temperatura žice raste i dolazi do promjene faze (eng. Shape Memory Effect phase change). Temperatura aktivacije i relaksacije kod Nitinola može se kretati u rasponu od  $-200$  do  $+110$  °C, ovisno o masenim udjelima elemenata.



Slika 22: Graf temperaturnih promjena

Graf prikazuje krivulju ponašanja mišićne žice pod djelovanjem konstantne sile [Slika 22]. Kako se žica grije, kontraktija slijedi desnu liniju. Kada temperatura dostigne točku  $A_s$ , počinje kontraktija žice koja završava u točki  $A_f$ , u kojoj je potpuno kontrahirana te ima austenitnu strukturu rešetke. Kada se žica hladi, temperatura slijedi lijevu krivulju. U točki  $M_s$  počinje relaksacija žice koja traje do točke  $M_f$ , u kojoj se postiže martenzitna struktura.

- **Temperatura prijelaza** (eng. *Transition Temperature*) - točka u kojoj se žica mijenja iz područja niske temperature u područje visoke temperature uslijed grijanja.
- **Temperatura početka aktivacije ( $A_s$ )** (eng. *Activation Start Temperature / Austenite Start Temperature*) - točka u kojoj kristalna struktura legure prelazi

iz niskotemperaturne martenzitne faze u visokotemperaturnu austenitnu fazu. Tu počinje kontrakcija žice i vraćanje u prijašnje naučeni oblik.

- **Temperatura kraja aktivacije ( $A_f$ )** (eng. *Activation Finish Temperature / Austenite Finish Temperature*) - točka u kojoj su svi atomi u kristalnoj rešetki posloženi u austenitnu strukturu. Ta točka određuje kraj kontrakcijske transformacije.
- **Temperatura početka relaksacije ( $M_s$ )** (eng. *Relaxation Start Temperature / Martensite Start Temperature*) - točka u kojoj kristalna struktura legure prelazi iz visokotemperaturne austenitne faze u niskotemperaturnu martenzitnu fazu. Tu počinje relaksacija žice.
- **Temperatura kraja relaksacije ( $M_f$ )** (eng. *Relaxation Finish Temperature / Martensite Finish Temperature*) - točka u koji su svi atomi u kristalnoj rešetki posloženi u martenzitnu strukturu. Ta točka određuje kraj relaksacijske transformacije.
- **Temperaturna histereza** (eng. *Temperature Hysteresis*) - razlika početne i konačne temperature koja pripada inicijalnim točkama strukture legure (kontrakcija i relaksacija). Memorijske legure imaju malu temperaturnu histerezu koja ovisi o temperaturi prijelaza legura.
- **Temperatura preoblikovanja** (eng. *Annealing Temperature*) - za mišićne žice, to je temperatura kod koje su izostavljena sva unutarnja naprezanja i kristalna struktura briše sva oštećenja nastala prijašnjim tretiranjem žice. To je temperatura kod koje memorijske legure pamte oblik u kojem se nalaze, za Nitinol ona iznosi 540 °C. Kod korištenja mišićne žice treba voditi brigu o tome da žice ne pregrijemo. Čak i ako je temperatura puno niža od temperature preoblikovanja, žica se može oštetiti i više neće odrađivati rad kao prije pregrijavanja. Osnovno pravilo je, da se relaksiranje mora događati trenutno, u protivnom je legura pregrijana.
- **Temperatura praoblikovanja** (eng. *Melting Temperature*) - temperatura u kojoj krutina postaje tekućina. Za nitinol ona iznosi 1300 °C.
- **Termička provodnost** (eng. *Thermal Conductivity*) - sposobnost materijala da provodi toplinsku energiju. Za Nitinol ona iznosi 0.08 W/cm<sup>0</sup>C u martenzitnoj fazi te 0.18. W/cm<sup>0</sup>C u austenitnoj fazi. [2]

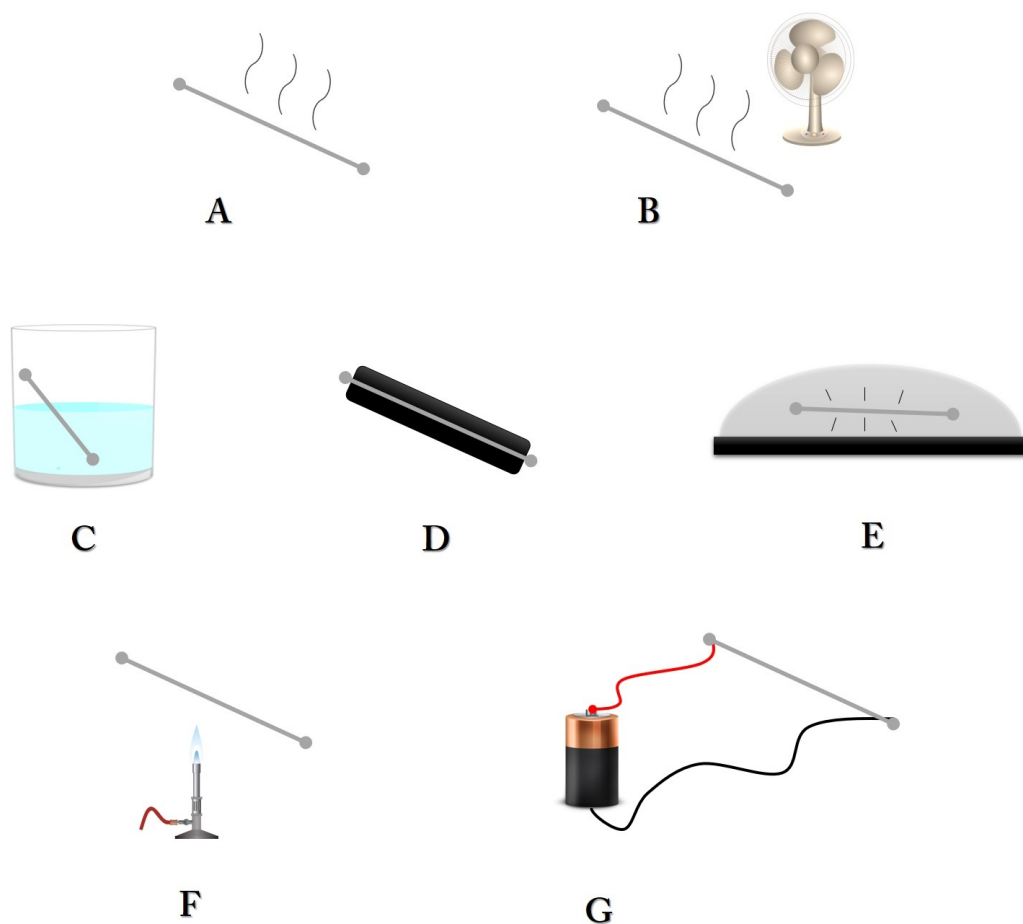
#### 4.2.6 Brzina

Brzina kod koje se mišićna žica kontrahira i relaksira ovisi o različitim faktorima koji uključuju okolinu i stanje same žice. Neovisno o tome da li se žica grije brzo ili sporo, kada žica postigne temperaturu prijelaza, generira istu silu i pomak. Brže se žice griju,

brži će biti i njihov ukupni ciklus. Tanka žica hladi se brže nego deblja pa je za uvećavanje sile bolje koristiti više tanjih žica nego jednu deblju.

### 4.3 Izvori energije

Za aktivaciju i relaksaciju mišićnih žica potrebno ih je grijati i hladiti. Režim grijanja i hlađenja prvenstveno ovisi o okolini u kojoj se nalazi mišićna žica. Voda, zrak, silikon ili neki drugi materijal imaju bitno različita svojstva kad je u pitanju provođenje topline [Slika 23].



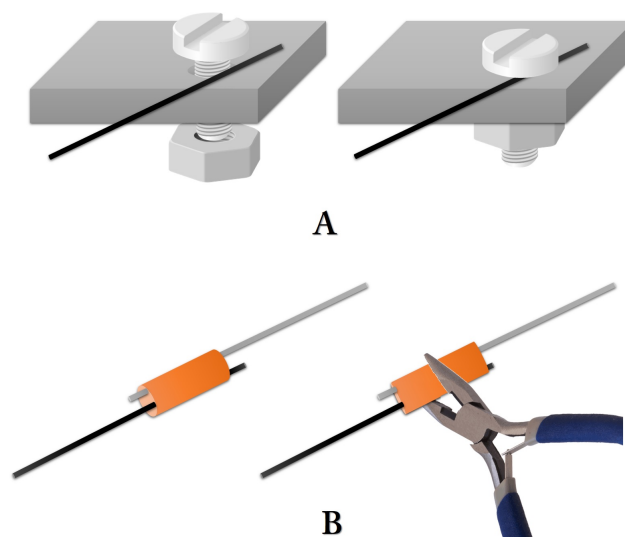
Slika 23: Izvori energije

Osnovni način grijanja ili hlađenja legura je na zraku (A). Promjena temperature se može ubrzati strujanjem zraka (B). Ubaci li se mišićna žica u vodu ili mješavinu vode i glicerina, promjena temperature će biti još veća (C). Ako se mišićna žica stavi u usku gumenu cjevčicu dobiva se efekt bržeg gijanja (D). Naime, kod hlađenja guma se ponaša kao hladnjak, pa je efekt hlađenja također brži. Vakuum se ponaša kao spor hladnjak, jedini način prijelaza energije je radijacija (E). Stavljanjem mišićne žice u kontakt sa termički konduktivnim materijalom, njezina temperatura će narasti. Mišićne žice se koje

rade u paru, ili kod većih mehanizma ili strojeva, se ugrađuju uz aktivne izvore energije velike snage kao što su grijači (F). No, jedan od najkorištenijih načina grijanja je spajanjem žice na izvor električne energije (G).

## 4.4 Spajanje

Mišićne žice se zbog temperature aktivacije koja je manja od  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ne smiju lemiti, budući da lemljenje djeluje na temperaturi od  $250$  do  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Logično je da bi ta temperatura oštetila mišićnu žicu. Memorijske legure se općenito se spajaju mehaničkim spojevima. Spojevi mišićnih žica moraju biti čvrsti i električki provodni ako kroz njih prolazi električna energija. Ukoliko nisu čvrsti, smanjiti će se ukupna snaga električne energije koja je dovedena na žicu.



Slika 24: Spajanje žica

## 4.5 Tehnički podaci

Tablica 3: Tehnički podaci prema temperaturi [2]

Nitinol		
Svojstvo	Temperatura	
	Niska	Visoka
Unutarnji otpor [ $\mu\Omega\text{cm}$ ]	76	82
Youngov modul elastičnosti [GPa]	28	75
Termička provodnost [W/mK]	8	18

Tablica 4: Tehnički podaci prema promjeru žice [2]

Nitinol				
Tip	Svojstvo	Debljina žice [ $\mu\text{m}$ ]		
		<b>50</b>	<b>150</b>	<b>250</b>
<b>Fizičko</b>	Minimalni polumjer savijanja [mm]	2.5	7.5	12.5
	Površina presjeka žice [ $\mu\text{m}^2$ ]	1960	17700	49100
<b>Električno</b>	Preporučena struja [mA]	50	400	1000
	Preporučena snaga [W/m]	1.28	8	12
<b>Čvrstoća</b>	Maksimalna sila relaksiranja @600 MPa [N]	1.15	10.35	28.74
	Preporučena sila relaksiranja @190 MPa [N]	0.34	3.32	9.11
<b>Brzina</b>	Maksimalna vrijeme kontrakcije [s]	0.1	0.1	0.1
	Vrijeme relaksacije [s]	0.3	2	5.5
	Broj ciklusa [n/min]	46	20	9
<b>Mehaničko</b>	Toplinski kapacitet [J/kgK]	322.38		
	Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	6450		
	Maksimalna deformacija [%]	8		
	Preporučena deformacija [%]	3-5		

Tablica 5: Tehnički podaci legura [3]

	Ni-Ti	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
Temperatura praoblikovanja [ $^{\circ}\text{C}$ ]	1300	950 - 1020	1000 - 1050
Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	6450	7640	7120
Unutarnji otpor [ $\mu\Omega\text{cm}$ ]	10 - 100	8.5 - 9.7	11 - 13
Termička provodnost [W/mK]	18	120	30 - 43
Youngov modul elastičnosti [GPa]	83 ( $A$ )	72 ( $\beta$ )	85 ( $\beta$ )
	26 - 48 ( $M$ )	70 ( $M$ )	80 ( $M$ )
Vlačna čvrstoća [MPa]	195 - 690 ( $A$ )	350 ( $\beta$ )	400 ( $\beta$ )
	70 - 140 ( $M$ )	80 ( $M$ )	130 ( $M$ )
Deformacija [%]	8	4	4
Temperaturni raspon [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-200 do +110	do 120	do 200
Temperaturna histereza [ $^{\circ}\text{C}$ ]	30 - 50	15 - 25	15 - 20

## 5 Materijali za izradu mekih robota

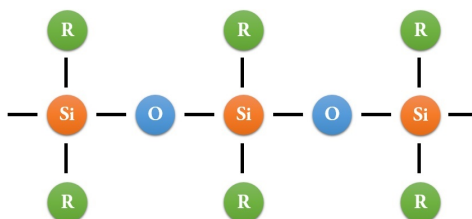
Materijali za izradu mekih robota moraju biti mekani, savitljivi i/ili elastični što i opisuje njihovo ime. Ukoliko su materijali kruti, meki roboti gube svoju osnovnu značajku. Materijali koji se najviše koriste su meki i elastični polimeri te elastomeri, poput guma i silikona te mekih metala (memorijske legure i sl.). Odabir materijala također ovisi o tehnologiji od koje se proizvodi, primjerice lijevanje, aditivne tehnologije i slično. Ipak jedan od materijala koji je zbog svoje jednostavnosti pronašao primjenu u toj grani robotike je silikon. Silikon spada u skupinu elastomera i vrlo je pogodan za lijevanje čime se mogu dobiti vrlo složeni oblici. Također, silikon se nakon deformiranja vraća u svoje osnovno stanje što je u mekoj robotici vrlo pogodno u slučaju kada aktuator radi samo u jednom smjeru pa osnovni materijal mekog robota radi suprotan pokret od aktuatora.

### 5.1 Elastomeri

Elastomeri (*lat. elasticus: rastezljiv*) su skupina polimernih materijala koja obuhvaća sve materijale na bazi prirodnoga i sintetskoga te kaučuka i sintetske polimerne materijale sa svojstvima sličnima kaučuku (npr. polibutadien, kopolimeri stiren-butadien i etilen-propilen, silikonski i fluorirani kaučuk). Građeni su od dugih, linearnih, makromolekularnih lanaca koji su međusobno povezani i slabo umreženi vulkanizacijom. Time se sprječava njihovo plastično oblikovanje, ali ostaje sačuvana pokretljivost dijelova lanaca što im daje izrazita elastična svojstva. U neopterećenom stanju imaju definirani oblik u koji se gotovo potpuno vraćaju i nakon snažnoga djelovanja vanjske sile i jakog izobličenja. Vulkanizacijom, tj. zagrijavanjem s prikladnim, posebno sumpornim spojevima, uz primješavanje različitih dodataka i punila (čade, oksida silicija, aluminijska, titana i cinka), elastomeri se prevode u gumu i mnogobrojne gumene proizvode velike rastezne čvrstoće i elastičnosti. [4]

### 5.2 Silikoni

Silikoni su polimerni organosilicijevi spojevi u kojima su silicijevi atomi naizmjenično povezani s kisikovim atomima u velike lančane (linearne) ili umrežene strukture [Slika 25].



Slika 25: Silikoni

Na silicijeve su atome vezane istovrsne ili raznovrsne organske skupine, najčešće metilna, a rjeđe fenilna, etilna ili propilna skupina. U tim se polimerima sjedinjuju svojstva organskih polimera (umjetnih smola) i anorganskih polimera (silikata). Silikoni se dobivaju od silicijeva tetraklorida koji s organskim kloridima daju silikokloride, npr.  $R_2SiCl_2$  (R je organska skupina); koji se hidroliziraju u silanole te  $R_2Si(OH)_2$  koji se zatim polikondenziraju u silikone.

Zbog svojih izvanrednih fizikalnih i kemijskih svojstava silikoni imaju, posebno u novije doba, veliku tehničku važnost i primjenu. Prema upotrijebljenim sirovinama mogu se dobiti kapljeviti (silikonska ulja), čvrsti (silikonske smole) ili elastični (silikonske gume) silikonski proizvodi. [4]

### 5.2.1 Silikonske gume

Silikonske gume ili silikonski elastomeri ostaju elastični i na vrlo niskim temperaturama, a podnose i vrlo visoke temperature. Vrlo su otporne prema kemijskim agensima; na njih ne djeluju voda, ozon, svjetlost, otapala ni oksidansi, ali su male mehaničke čvrstoće i slabe otpornosti prema trošenju. Rabe se za izradu složenih izolacijskih materijala i visokonaponskih izolatora.

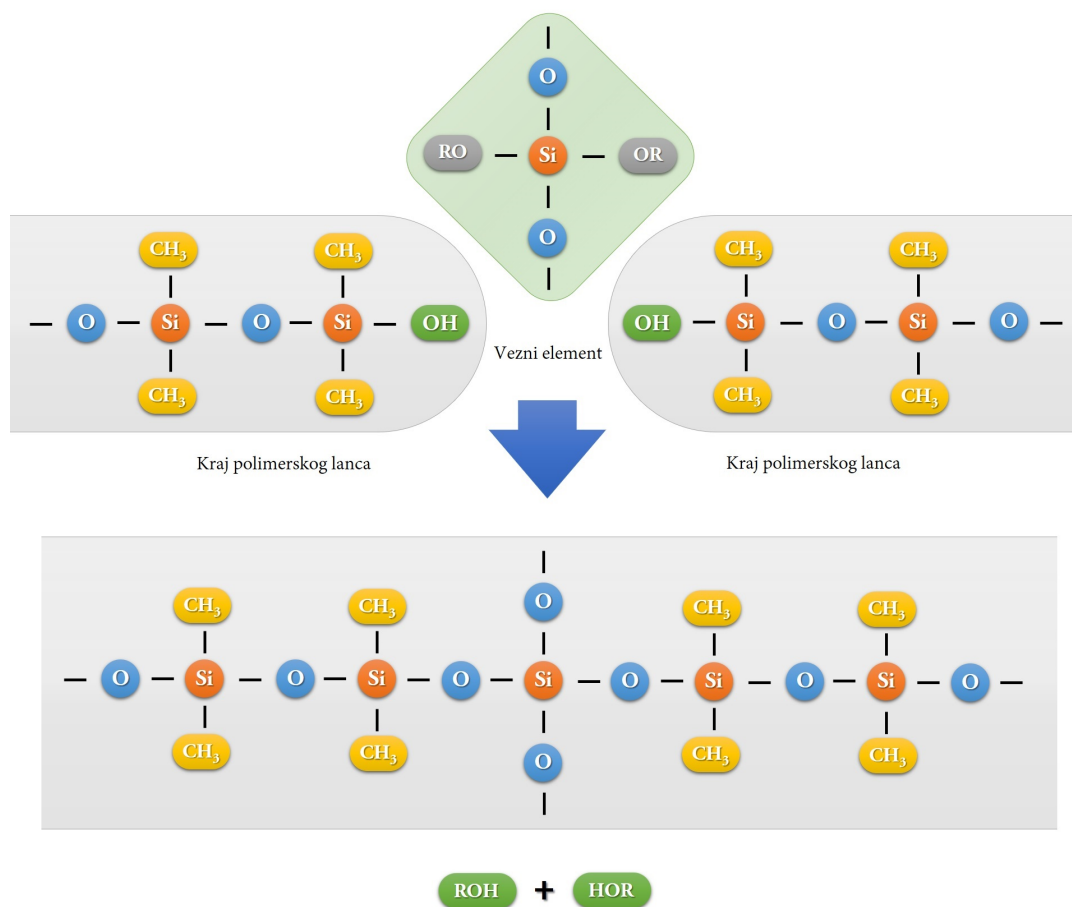
Silikonski elastomeri sastoje se od tekućih komponenti s velikim rasponom viskoziteta koji se transformiraju u gumeno elastično stanje različitim vulkanizacijskim postupcima. Oni imaju izvrsne karakteristike što ih čini prikladnim za upotrebu u visokokvalitetnim aplikacijama.

- Dobra stabilnost na temperaturama od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Visoka otpornost na zračenje u području mikrovalova do UV zračenja
- Prilagodljiva ljepljiva svojstva
- Visoka otpornost na kemikalije
- Visoka prozirnost
- Vrlo dobra i trajna električna izolacijska svojstva pri različitim temperaturama
- Ekološki neškodljivi

### 5.2.2 RTV silikoni

RTV silikoni (*eng. Room Temperature Vulcanization Silicon*) su vrsta silikonske gume izrađene od dvokomponentnog sustava (baza plus vezivo, A + B) raspoloživa u rasponu tvrdoće od vrlo mekog do srednje mekog, obično od 15 do 40 Shore A. Kako bi se proizveo materijal, silikonska guma se pomiješa s sredstvom za stvrdnjavanje ili sredstvom za

vulkanizaciju [Slika 26]. Obično je omjer miješanja nekoliko posto. Vakuumski podtlak uklanja nastale mjehuriće zraka iz miješanog silikona i katalizatora kako bi se osigurala optimalna čvrstoća rastezanja.



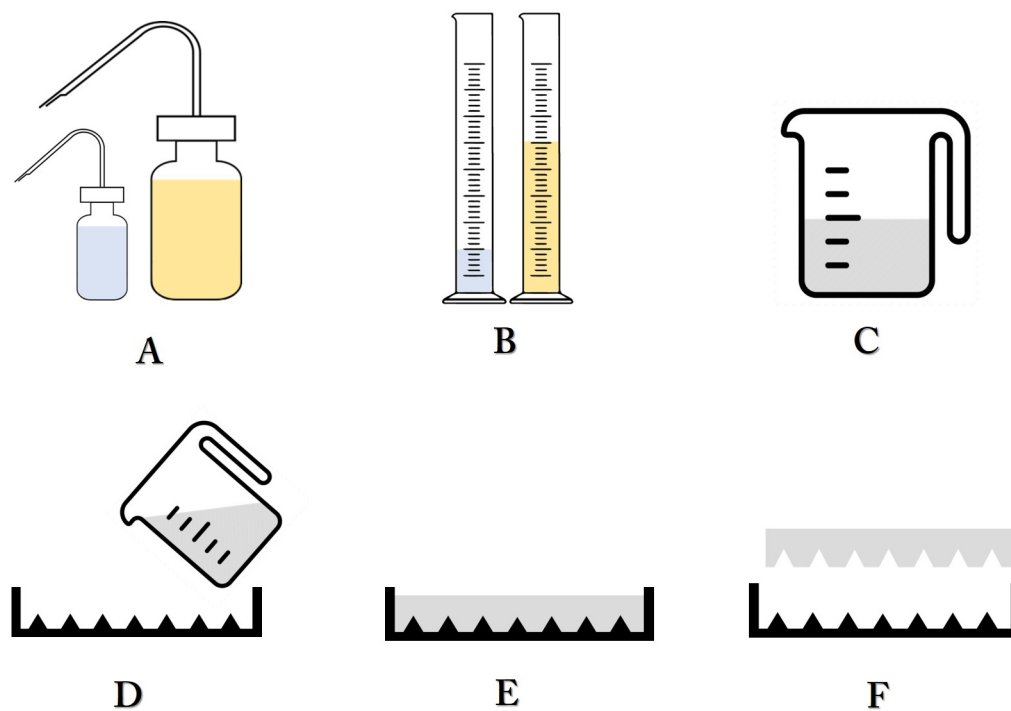
Slika 26: Vulkanizacija silikona

U lijevanju, RTV silikonska guma reproducira fine detalje i pogodna je za razne industrijske i umjetničke aplikacije, uključujući prototipove, namještaj, skulpturu i arhitektonske elemente. RTV silikonska guma može se koristiti u lijevanju. RTV silikonska guma ima izvrsna svojstva otpuštanja što je posebno prednost pri proizvodnji lijevanja. Nije potrebno sredstvo za otpuštanje, uklanjanje čišćenja nakon proizvodnje. Silikoni također pokazuju dobru otpornost na kemikalije i na povišenu temperaturu. Nažalost RTV silikonske gume su općenito skupe. One su također osjetljive na tvari koje mogu spriječiti stvrdnjavanje silikona. Silikoni su obično vrlo gusti (visoki viskozitet), i moraju biti vakuumski degazirani prije izlivanja kako bi se smanjilo zarobljavanje mjehurića. Ako se lijeva kalup sa puno finih detalja, vrijeme stvrdnjavanja između slojeva je dugo.

Kod lijevanja [Slika 27] RTV silikona postoje dvije komponente koje se miješaju u točno određenom omjeru. Silikonske komponente (A) moraju biti precizno izmiješane po težini ili volumenu (B), ili u protivnom konačni proizvod neće biti dobar. Komponente se nakon mjerenja moraju dobro izmiješati u homogenu otopinu (C), nakon čega se mogu



lijevati u kalup (D). Lijevani kalup suši se na sobnoj temperauri, obično 24 sata (E). Odkalupljivanje suhog kalupa je jednostavno, budući da se silikon, kada se osuši, sam odvoji od kalupa (F).



Slika 27: Lijevanje silikona

## 6 Projektiranje mekog robota

Meki roboti oponašaju organizme iz prirode. Oponašanje ne znači kopiranje, već djelomično slijeđenje određenih mehanizma koji se mogu primjetiti u živućem organizmu. Jedan od zanimljivijih mehanizma je mehanizam kretanja. Kretanje je u znanosti poprilično česta tema istraživanja, budući da velika većina mehanizma u današnje vrijeme koristi kotač. Kotač ima puno prednosti, kao što je postizanje velikih brzina. Jedan od većih nedostataka kotača je neprilagodljivost terenu, tj. kotač može normalno djelovati na relativno ravnoj površini bez velikih rupa ili prepreka. Baš zbog toga je traženje mehanizma kretanja u prirodi česta tema, budući da životinjski svijet ne koristi kotač za kretanje, već noge i tijelo te time mogu hodati preko zahtjevnih terena.

Jedni od zanimljivijih organizama za proučavanje mehanizma kretanja su gusjenice. Zbog svoje naizgled jednostavne građe i načina kretanja čest su predmet istraživanja. Puzanje nije samo mehanizam koji se može pronaći samo kod gusjenica, već i kod drugih organizama različitih rodova i vrsta. No, gusjenica je zanimljiva prvenstveno zbog toga jer za kretanje uz male nožice koristi tijelo koje se razvlači i skuplja uz podizanje cijelog tijela [Slika 28].



Slika 28: Pokret gusjenice

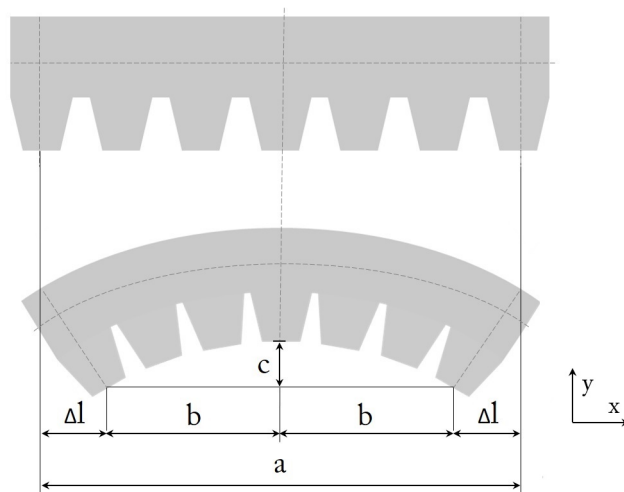
*Preuzeto: 26.4.2017. Izvor: <https://en.wikipedia.org/>*

### 6.1 Teorija puzanja

Mehanizam rastezanja i skupljanja može se koristiti kao mehanizam hodanja u robotici. Budući da je promjena duljine osnova ovakvog kretanja, vrlo je pogodan za meku robotiku koja koristi meke i deformabilne materijale.

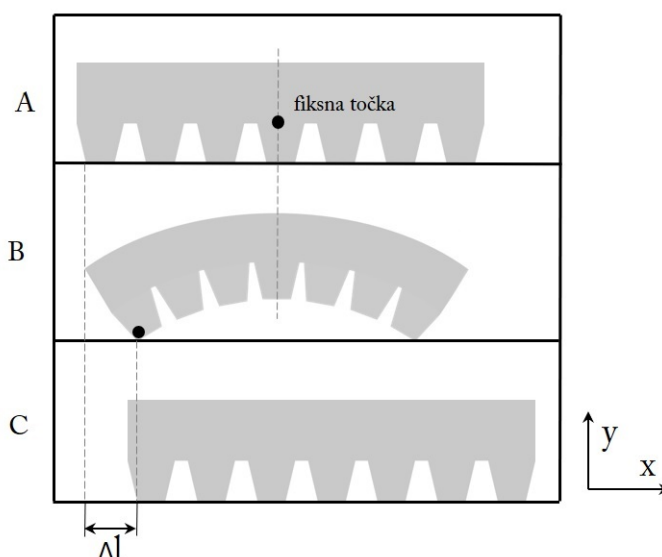
Ako proizlazimo od pretpostavke da nam za pokret treba deformacija tijela, potreban je materijal koji dobro podnosi deformacije i koji se tijekom deformacije ne oštećuje. Već navedene silikonske gume su vrlo pogodne, budući da su jako elastične i deformabilne te imaju sposobnost vraćanja u početni oblik. Također, mogu se lijevati u željeni oblik i nisu štetne za okoliš.

Ako se koristi deformacija tijela kao osnovna faza pokreta, konstruirano tijelo mora omogućiti deformaciju u željenom smjeru, bez prevelikih naprezanja koji deformaciju ograničavaju. Budući da je želja postići deformaciju uvijek u istom smjeru, tijelo se može konstruirati kao leđa na kojima se nalaze nožice. Razmaci između nožica omogućuju lakšu deformaciju i izbacuju nepotrebne deformacije tijela [Slika 29].



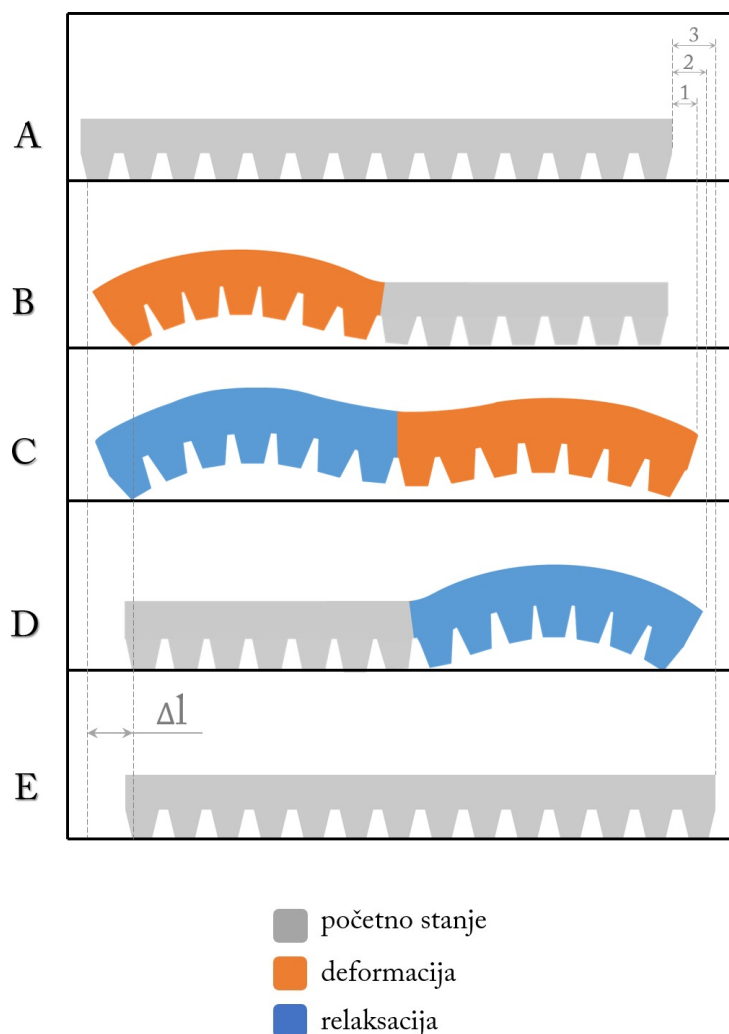
Slika 29: Osnovni segment

Tako deformirano tijelo u smjeru osi  $x$  postiže promjenu duljine [Slika 30]. Promjena duljine ostvaruje se između krajnjih točaka nožica tijela uz podizanje sredine tijela u smjeru  $y$ . Oba pokreta su korisna. Predpostavimo da nedeformirano tijelo ima fiksnu točku na svojoj sredini. Tijekom deformacije, tijelo je kraće za  $l$ , uz podizanje za  $c$ . Predpostavimo li da je fiksna točka deformiranog tijela jedna od krajnjih točki nožica, vraćanjem tijela u prvobitni položaj, tijelo pomiče svoj položaj za  $l$ .



Slika 30: Osnovni pokret

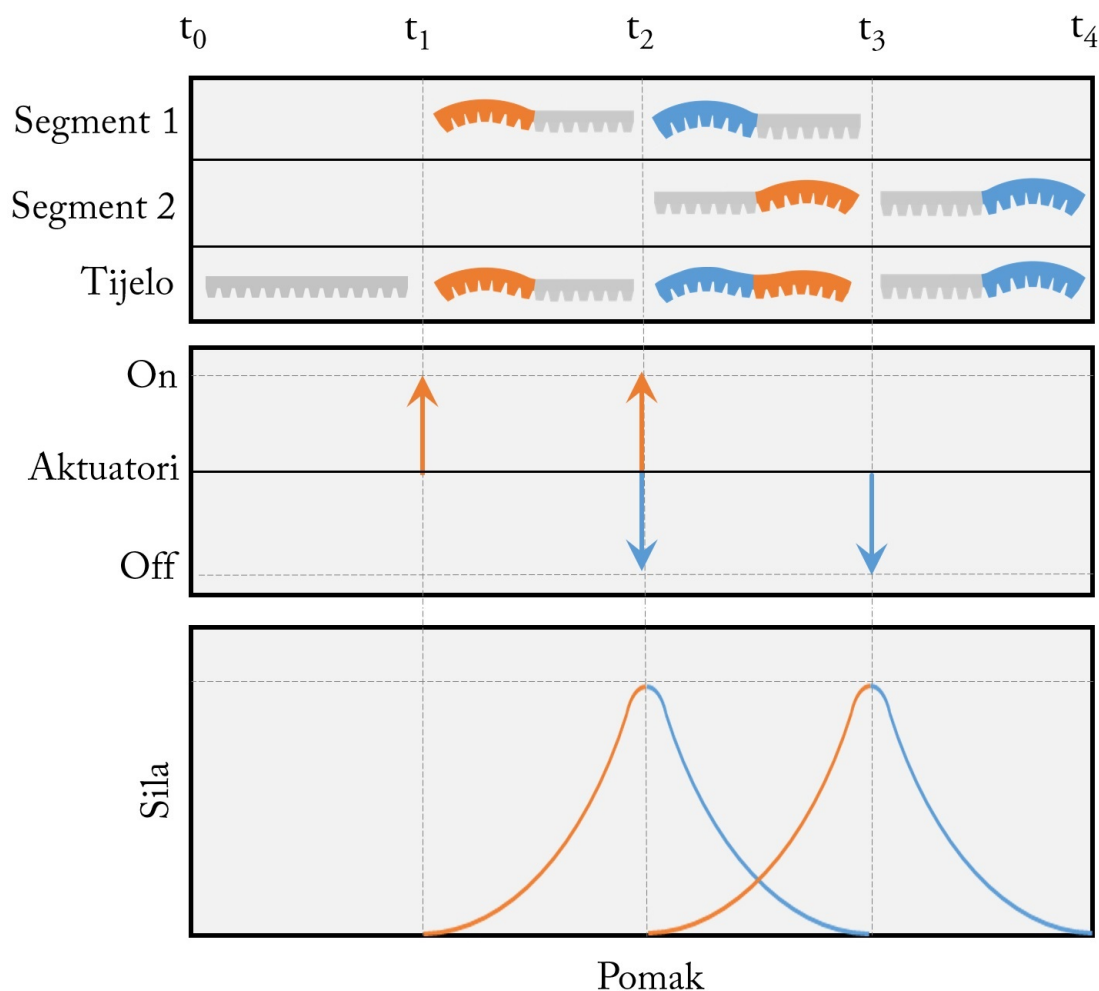
Podizanje u smjeru  $y$  je neizbježna kod takve vrste deformiranja tijela, jer se takva pojednostavljena deformacija odvija u dvije dimenzije. Deformacija u širinu ili  $z$  smjeru koji ovdje nije naznačen je u navedenom slučaju zanemariv. Podizanje u smjeru  $y$  omogućava tijelu lakše pomicanje po podlozi, budući da je time tijelo koje stvara trenje na podlozi podignuto pa tijelo u teoriji po površini klizi u teorijskoj liniji [Slika 31].



Slika 31: Ciklus pokreta

Za hod koji u teoriji oponaša mehanizam hodanja gusjenice, uzeta su dva osnovna elementa koja su u radu međusobno sinhronizirana. Princip hodanja temelji se na dva elementa u kojima se izmjenjuju faze deformacije i relaksacije. Ako se uzme tako konstruirano robotsko tijelo, hod počinje od jedne početno definirane točke (A). Slijedi prva deformacija zadnjeg segmenta koji se deformira u smjeru  $x$  i  $y$ . Fiksnim elementom možemo smatrati prvi segment koji je dovoljno čvrsto pozicioniran na podlogu i ne dozvoljava tijelu micanje u smjeru suprotnom od smjera  $x$  (B). Nakon deformacije zadnjeg dijela slijedi njegova relaksacija i deformacija prvog segmenta (C). Promjena je potrebna u isto vrijeme da se pomak koji je ostvaren u predhodnoj fazi pomakne na prvi segment. Teorij-

ska fiksna točka nalazi se na zadnjoj nožici u točki dodira s površinom na kojoj se nalazi. Tijekom deformacije prvog dijela, napravljen je prvi pomak (1). Kada se zadnji segment potpuno istegne učinjen je drugi pomak (2) koji je rezultat potpune relaksacije zadnjeg segmenta (D). Tu počinje i relaksacija prvog dijela koji ostvaruje zadnji pomak (3). Time je jedan ciklus pokreta završen. Ciklus se može ponavljati i time se ostvaruje neprekidno puzanje robota.

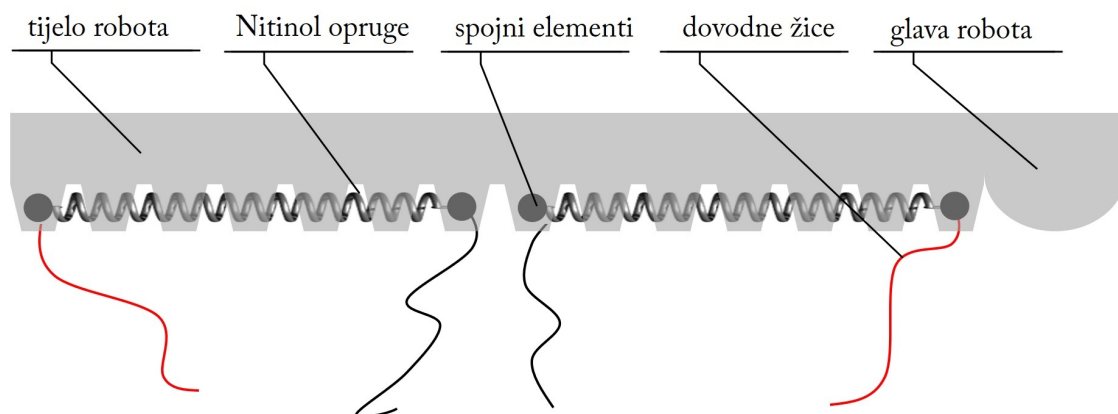


Slika 32: Faze pokreta

Svaka deformacija rezultat je pomaka kojeg generira aktuator. Svaki pomak aktuatora je generiran silom koja mora svladati otpornost tijelo robota ka deformaciji. Aktuator deformira tijelo robota u jednom smjeru. Za relaksaciju tijela potreban je suprotan pomak aktuatora. Za suprotan pomak također je potrebna sila koja generira pomak.

## 6.2 Koncept mekog robota

Teorija hodanja prikazana u prethodnom poglavlju bit će implementirana u tijelo robota napravljenog od silikona sa aktuatorima napravljenih od memorijskih legura [Slika 33]. Uloga aktuatora je generiranje pomaka i sile u smjeru deformacije tijela robota, dok je uloga silikona povratak tijela u početni položaj. Naime, memorijske legure djeluju u jednom smjeru te je za njihov povratak u početni oblik potrebnavaljska sila koju generira deformirani i elastični silikon. Silikon tijekom deformacije generirane aktuatorima u sebi skladišti elastičnu energiju koja se koristi za relaksaciju robota u početni oblik. Sila koja je potrebna za povratak aktuatora je oko desetak puta manja od one koju generiraju tijekom faze deformiranja, pa je skladištena elastična sila u silikonu dovoljna za povratak.



Slika 33: Prikaz osnovnih dijelova robota

Tijelo robota sastoji se od dva segmenta koji upravljački ne ovise jedan o drugome. Aktuatori su Nitinol opruge koje su smještene u nožice tijela gdje se događaju najveći pomaci. Nitinol opruge su žicama spojene za upravljačku elektroniku koja služi za opskrb-ljivanje aktuatora električnom energijom. Žice su na aktuatore spojene čvrstom vijčanom vezom koja mora osigurati dobru provodljivost električne energije.



Slika 34: Glava robota

Tijelo robota od silikona ima leđa koja služe za povratak u početni oblik. Na početku robota je glava polukružnog oblika koja služi da se kod relaksacije prvog elementa nožica koja je u doticaju sa podlogom ne zakoči [Slika 34].

### 6.3 Odabir silikona za izradu mekog robota

Za izradu mekog robota odabran je adicijski dvokomponentni silikon koji otvrdnjava na sobnoj temperaturi, pod imenom ALPA-SIL MF 3, proizvođača POLYCHEM d.o.o. Silikon se umrežuje na temperaturama većim od 23 °C bez prisutnosti zraka, ima vrlo dobra mehanička svojstva i jednostavan je za preradu. Skupljanje pri otvrdjivanju mu je neznatno, kod umreživanja nema toplinskih reakcija te se većinom primjenjuje u kalupljenju.

#### 6.3.1 Tehnički podaci

Tablica 6: ALPA-SIL MF 3 [5]

ALPA-SIL MF 3		
	Komponenta A	Komponenta B
Izgled	viskozna tekućina	
Boja	djelomično proziran	
Viskozitet <sup>1</sup> [mPa·s]	25000	7000
Gustoća <sup>1</sup> [g/cm <sup>3</sup> ]	1.1	
	Miješanje	
Omjer miješanja	100 : 10	
Otvoreno vrijeme <sup>1</sup> [min]	60	
Otkalupljivanje nakon <sup>1</sup> [h]	1	
	Otvrdnjavanje	
Tvrdoća <sup>2</sup> [Shore A]	28	
Vlačna čvrstoća [MPa]	7.5	
Istezljivost <sup>2</sup> [%]	600	
Otpornost prema kidanju <sup>2</sup> [N/mm]	20	
Linearno skupljanje [%]	< 0.1	
komponenta B sadrži platinasti katalizator		
<sup>1</sup> Mjereno pri standardnim uvjetima prema DIN 50 014-23/50-2		
<sup>2</sup> Mjereno nakon 14 dana u standardnim uvjetima prema DIN 50 014-23/50-2		

#### 6.3.2 Miješanje

ALPA-SIL MF 3 komponente A + B se miješaju u zadanom omjeru (vidjeti tehničke podatke). Komponente se miješaju ručno ili mješalicom. Mješalica treba raditi na niskim okretajima kako se nebi stvorili mjehurići zraka u smjesi i/ili povećala temperatura. Smjesu treba staviti na potlak (vakuum) od 30 do 50 mbar da bi se izbacio preostali zrak

iz smjese. Smjesa pod vakuumom poveća svoj volumen 3 do 4 puta, a mjehurići zraka izađu na površinu. Nakon približno 5 do 10 min smjesa se vraća na svoj prvobitni volumen. Smjesu treba pustiti još par minuta u vakuumu i potom je proces gotov, a smjesa je spremna za korištenje. [5]

### 6.3.3 Lijevanje

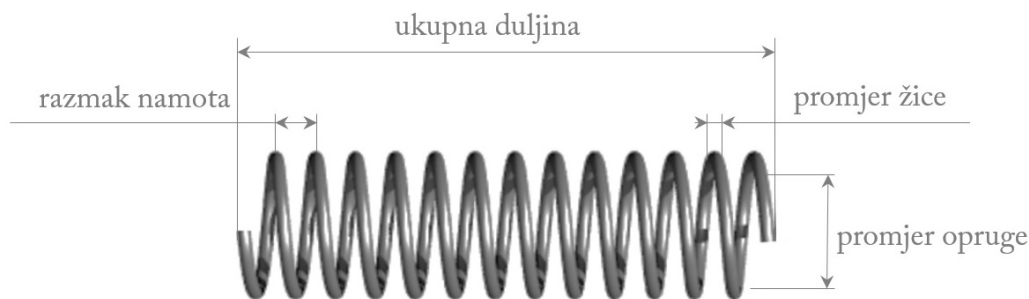
Kalup u koji se lijeva silikon nije potrebno premazivati nikakvim sredstvima za odvajanje proizvoda od kalupa. Silikon otvrdjuje pri 23 °C; pri nižim temperaturama otvrdnjavanje je sporije, a pri višim brže. Silikon se prije vađenja iz kalupa mora sušiti 16 sati. Kada je odljevak suh, se samostalno odvoji od kalupa. [5]

## 6.4 Odabir aktuatora mekog robota

Aktuatori mekog robota su Nitinol opruge promjer žice od 0.25 mm, proizvođača *Kellogg's Research Labs*. odabrane su dvije veličine, 2.4 mm i 3.2 mm. Opruge se aktiviraju na 80 °C i mogu se grijati električnom energijom. Dolaze u ukupnoj duljini od 5 mm i to je duljina potpuno sakupljenih opruga. Rastezanjem 5 mm može se postići duljina i do 7 cm gdje se mogu rezati na željenu duljinu koja se ugrađuje u silikon.

Tablica 7: Tehnički podaci Nitinol opruga

Kellogg's Research Labs		
	Nitinol opruge	
Specifikacije	#1	#2
Promjer opruge [mm]	2.4	3.2
Promjer žice [mm]	0.25	0.25
Temperatura prijelaza [°C]	80	80
Razmak namota [mm]	0.25	0.25
Ukupna duljina [mm]	5	5



Slika 35: Specifikacije opruga

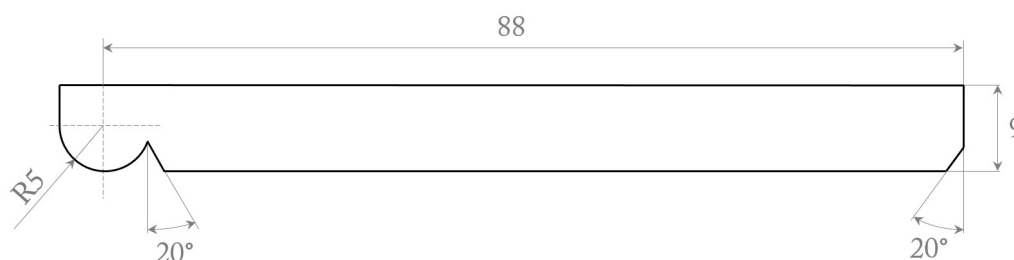


## 7 Konstrukcija kalupa

Konstrukcija kalupa sastoji se od dvije faze: modeliranje modela te modeliranje kalupa iz prethodno modeliranog modela robota oduzimanjem materijala. Model kalupa rađen je u CAD programskom paketu *Catia V5R19*.

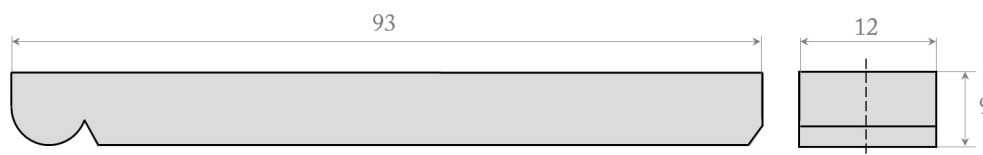
### 7.1 Modeliranje robota

Prvi *Sketch* je osnovni okvir robota izvan kojih neće biti dodavanja novog materijala. Koordinatni sustav smješten je u centar polumjera glave [Slika 36].



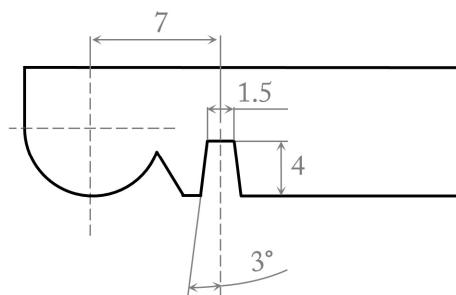
Slika 36: Osnovni okvir robota

Iz nacrtanog *Sketcha* slijedi prvi *Pad* koji je generiran ekstrudiranjem u oba smjera za ukupnu mjeru od 12 mm [Slika 37].



Slika 37: Osnovni model robota

Potrebne nožice dobiju se oduzimanjem materijala u jednakim razmacima. Potrebno je napraviti osnovni razmak koji služi za generiranje nove značajke [Slika 38].



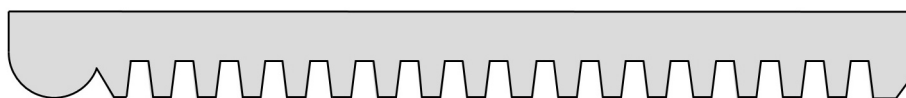
Slika 38: Konstrukcija nožica

Uglove nožica i sve ostale prijelaze dobro je spojiti preko malih radijusnih površina budući da je silikon kod deformacija osjetljiv na unutarnje oštre rubove gdje su najveće zone naprezanja [Slika 39].



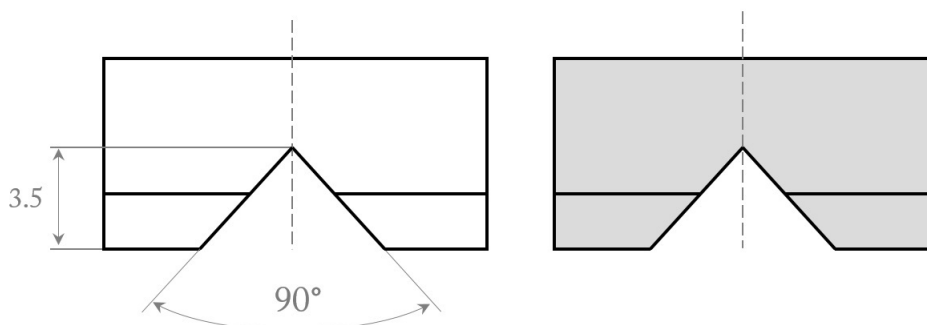
Slika 39: Praznina između nožica

Multiplikacija nožica dobiva se linearnim umnožavanjem prethodne značajke u linearnom smjeru u jednakim razmacima. Krajnje površine nožica moraju biti u kosini zbog kako bi se robot mogao vaditi iz kalupa bez da se ukoči. Također, kosina nožica je bitna kako kod deformacije tijela robota nebi doslo do dodirivanja nožica i prekida deformacije [Slika 40].



Slika 40: Multiplikacija nožica

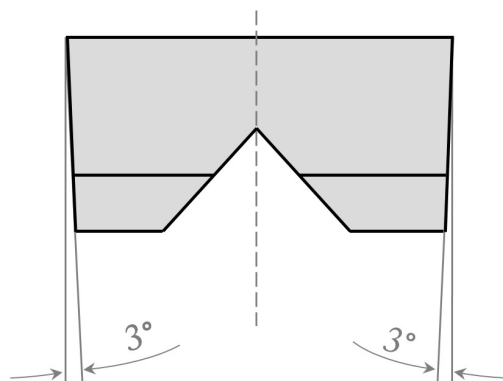
Ako se tijelo robota podijeli na leđa i nožice, nožice su dio tijela koje ne sudjeluju u deformaciji pa tako ne skladište elastičnu energiju. Uz tu pretpostavku mogu se reducirati, čime se uštedi na masi samog robota. Redukcija nožica će smanjiti masu za nekoliko grama. No, ako uzmemo u obzir da je cijeli robot lakši od nekoliko desetaka grama, oduzimanjem nekoliko grama od cijelog robota možemo na masi uštedjeti i do 10% [Slika 41].



Slika 41: Redukcija nepotrebnog materijala

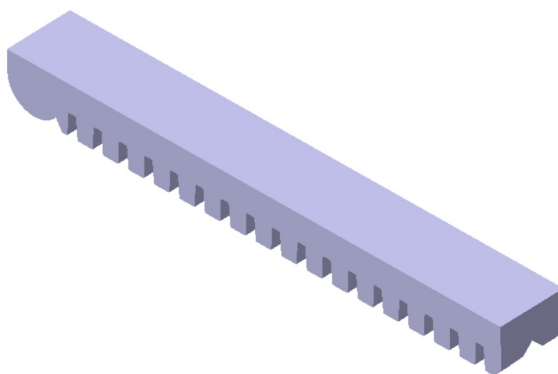
Da bi se lijevano tijelo robota moglo izvaditi iz kalupa, bitno je da nema okomitih površina [Slika 42]. Ukoliko bi površine tijela bile okomite, bilo bi jako teško izvaditi

odljevak ili čak nemoguće, jer da bi kod čupanja ukočenog kalupa moglo doći do pucanja tijela robota.



Slika 42: Kosine za lakše vađenje iz kalupa

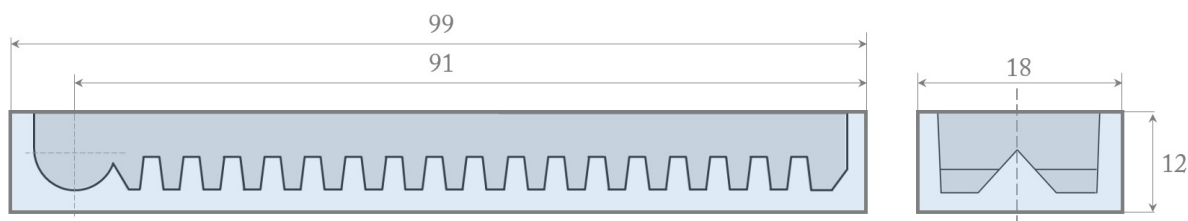
Načinjeni model robota, služi nam za konstrukciju kalupa. Osim za trodimenzionalni model kalupa služi nam i za vizualizaciju i provjeru samog modela robota.



Slika 43: 3D model mekog robota

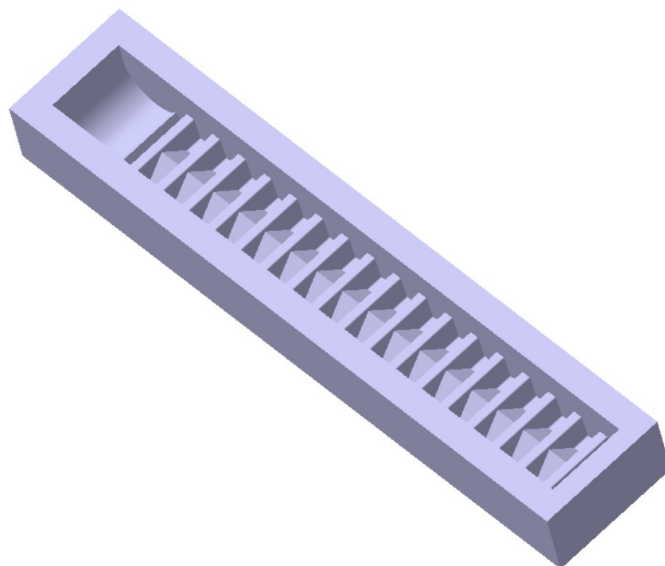
## 7.2 Modeliranje kalupa

Modeliranje kalupa zasnivano je na oduzimanju načinjenog modela robota od punog modela ili kvadra koji poprima taj oblik kada je odljevak još u kalupu [Slika 44].



Slika 44: Modeliranje kalupa

U dimenzije je potrebno dodati dimenzije robota uz dimenzije okvira samog kalupa. Dimenzije okvira su 3 mm sa svake strane. Pozicioniranje modela robota u kalup napravljeno je pozicioniranjem koordinatnog sustava kalupa u istu poziciju kao kod modela robota.



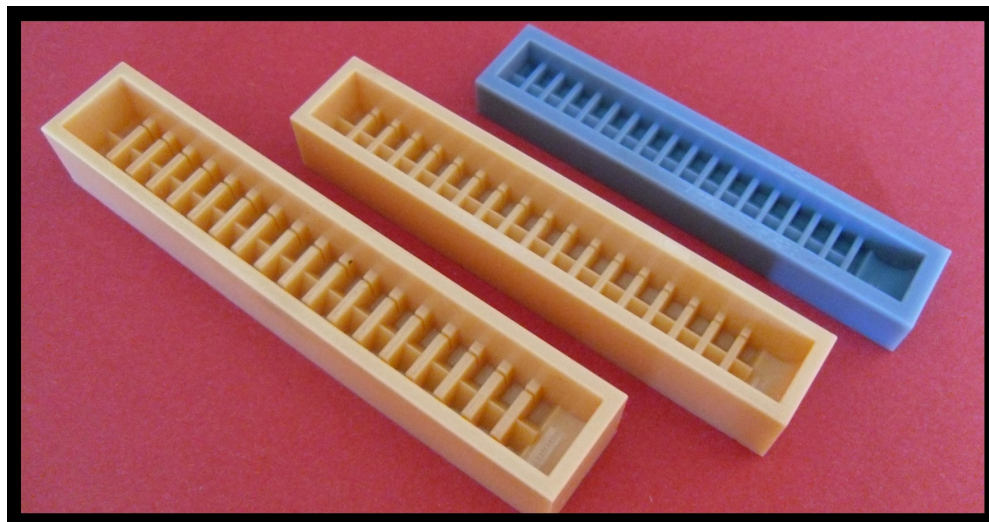
Slika 45: Kalup mekog robota

Model robota je u model kalupa dodan kao novi *Body* koji se pozicionira sa prethodno definiranim koordinatnim sustavom. Model kalupa se dobiva oduzimanjem *Body*-a modela robota od *Body*-a modela kalupa uz pomoć funkcija koje se nazivaju *Boolean operators*. U nožice se u kalup prije lijevanja uronjuju Nitinol opruge koje trebaju biti što niže, pri dnu robota. Zato je u kalup dobro načiniti mali kanalić od polovice milimetara u kojeg će stati opruga prije lijevanja. Kalup ide na izradu na stroj za brzu izradu prototipova pa se kanalić može izmodelirati prije izrade kalupa ili se može izglodati nakon izrade.

## 8 Izrada mekog robota

### 8.1 Izrada kalupa

Kalup mekog robota izrađen je u tri različite veličine. Razlike u dimenzijama su svega nekoliko milimetara, ali dovoljno da se uoče neke razlike u brzini deformacija i relaksacija. Kalupi su izrađeni na strojevima za brzu izradu prototipova ili aditivnom tehnologijom [Slika 46].



Slika 46: Kalup

#### 8.1.1 Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja (engleski Additive Manufacturing), dio proizvodnoga strojarstva koji se bavi izradbom predmeta nanošenjem čestica u tankim slojevima. Proizvodni proces započinje konstruiranjem trodimenzionalnoga modela računalnim CAD programima za modeliranje, ili digitaliziranjem prostornoga oblika već postojećega objekta trodimenzionalnim skenerima. Zatim se model pretvara u niz horizontalnih poprečnih presjeka koji se strojem za proizvodnju tvorevina otiskuju sloj po sloj do konačnog proizvoda. Tim se postupcima jednako uspješno mogu izraditi prototipovi, kalupi i alati velike preciznosti te funkcionalni dijelovi spremni za upotrebu. No brzina izradbe, izbor materijala i dimenzije modela zasad su ograničeni.

Ovisno o tehnologiji dobivanja slojeva i upotrijebljenim materijalima, koji mogu biti u krutom, tekućem i praškastom stanju, razvijeno je više postupaka aditivne proizvodnje. Najčešće se upotrebljavaju polimerni materijali, kao akrilonitril/butadien/stiren (ABS), poliamidi (PA), polikarbonat (PC), poli(metil-metakrilat) (PMMA), poli(vinilklorid) (PVC), poliuretan (PUR), epoksidne smole, ali i kompozitni materijali, keramika, čelik, titanij i druge lake slitine. Prema primijenjenoj tehnologiji postupci aditivne pro-

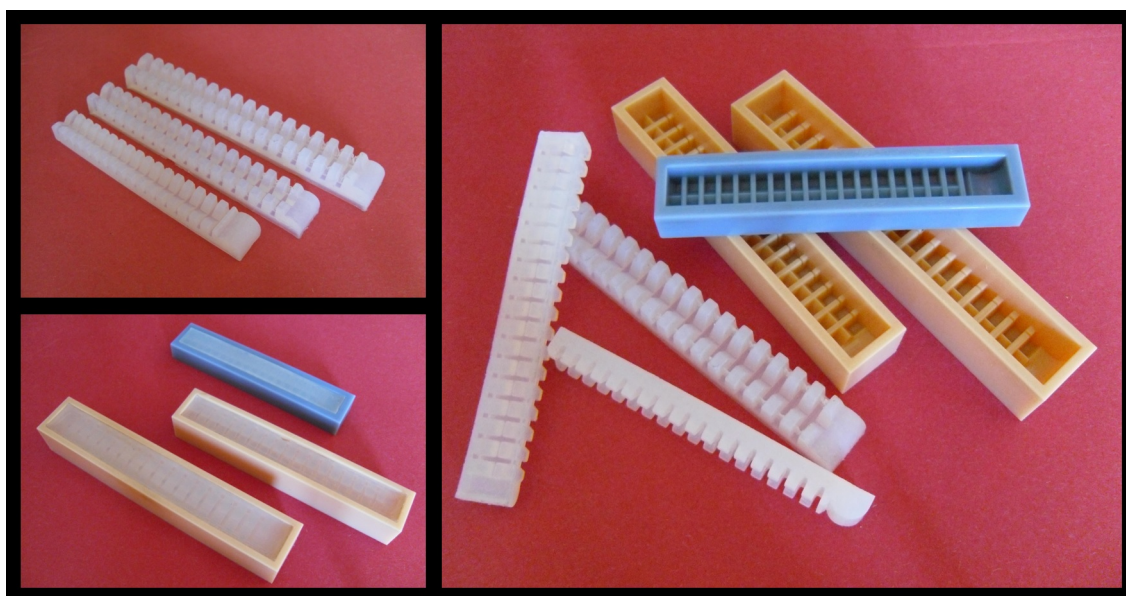
izvodnje uobičajeno se razvrstavaju na fotopolimerizaciju (stereolitografija), raspršivanje veziva (trodimenzionalni ispis), raspršivanje materijala (PolyJet postupak) i ekstrudiranje materijala (taložno srašćivanje), laminiranje (proizvodnja laminiranih objekata), stapanje praha (selektivno lasersko srašćivanje) i izravno taloženje materijala. [4]

### 8.1.2 PolyJet postupak

PolyJet postupak hibridni je postupak stereolitografije i trodimenzionalnoga tiskanja. Spuštanjem radne podloge sapnica raspršuje sloj polimernog materijala koji se skrućuje pod utjecajem ultraljubičaste svjetlosti i veže se na prethodni sloj. Prilikom tiskanja izrađuje se model i potporna struktura, koja se nakon izradbe lako uklanja vodom. [4]

## 8.2 Lijevanje kalupa

Kalupi su lijevani na sobnoj temperaturi bez dodatnih izvora topline. Dvokomponentni silikon je miješan u omjeru 1:10 i mjeran volumenski, 10 mL komponente A te 1mL komponente B. Komponente su dobro izmiješane i lijevane u kalup u vrlo uskoj mlaznici veličine niti ili tanje žice. Tanka mlaznica je veoma važna kako bi se zapunili svi mali detalji koji se nalaze u kalupu. Ukoliko se lijeva velikim mlazom, potreban je dodatni podtlak koji će izbaciti nastale mjehuriće zraka. Kalup je nakon lijevnja ostavljen 24 sata. Prvo lijevanje izvedeno je bez aktuatora, iz razloga da se uvježba tehnika i način lijevanja te da se vide svojstva sijevanog silikona [Slika 47].

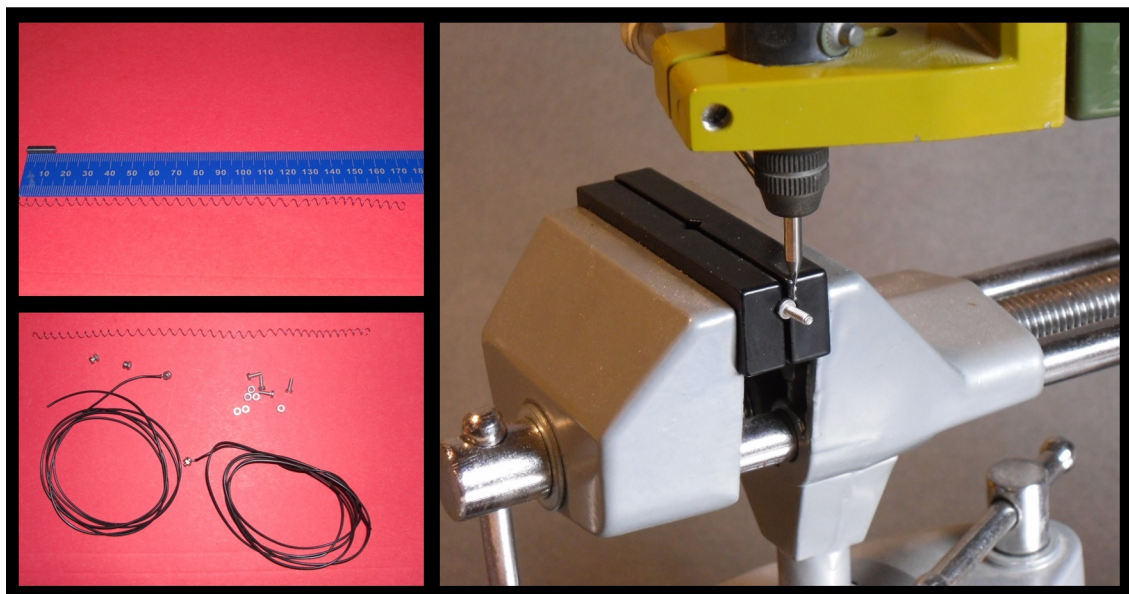


Slika 47: Kalup i odljevci



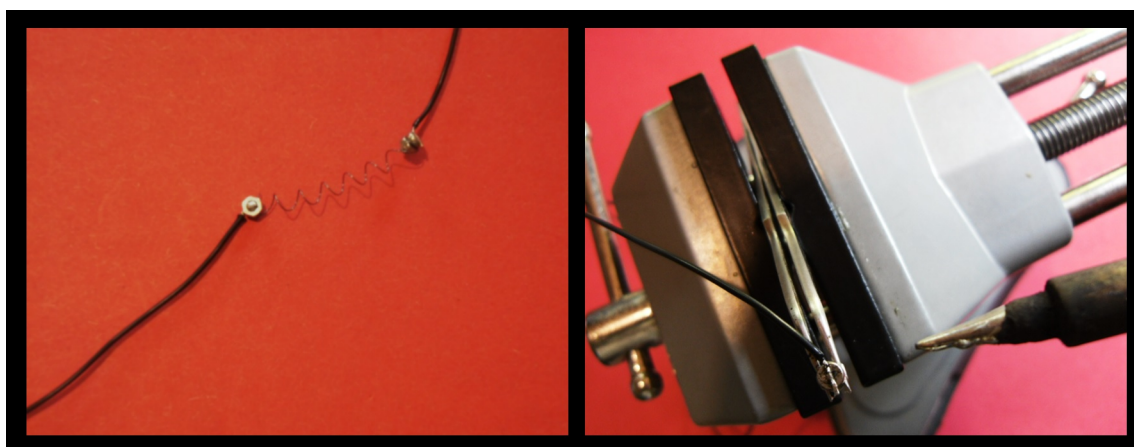
### 8.3 Priprema aktuatora

Aktuatori u industrijskom stanju dolaze duljine 10 mm, potpuno sakupljeni. Njihovim rastezanjem može se postići duljina do 180 mm te se na toj dulji podijeli na četiri dijela. Tako se dobivaju četiri aktuatora koji se ugrađuju u robota. Aktuatori se napajaju električnom energijom koja se do njih dovodi žicom. Žica treba biti mekana, prvenstveno zato da ne ometa robota dok hoda. Žicu treba spojiti s oprugom no ne lemljenjem budući da će lemljenjem opruga biti uništena [Slika 48].



Slika 48: Priprema spojnih elemenata

Opruge i žice se spajaju vijčanim spojem M2. Kroz vijak je probušena mala rupa, promjera 0.7 milimetara kroz koji će se provući opruga i zategnuti maticom. Na vijak se lemi dovodna žica [Slika 49].

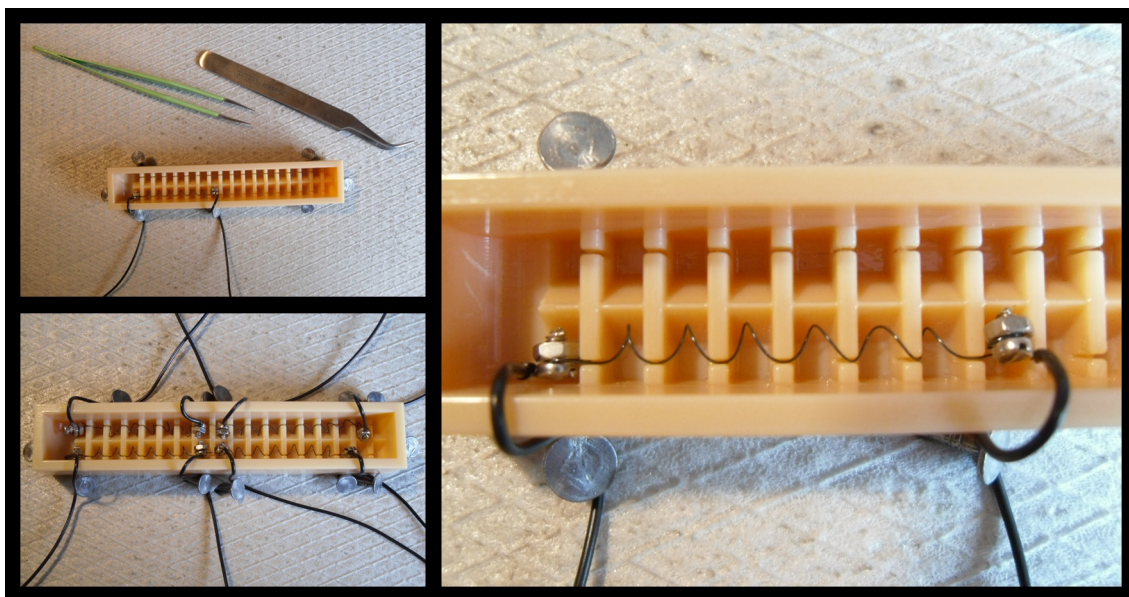


Slika 49: Priprema aktuatora

Nakon lemljenja se može spojiti opruga koja mora biti jako dobro pritegnuta kako bi se osigurao dobar prolazak električne energije. Također, vijčani spoj mora biti čvrst kako nakon puno faza grijanja i hlađenja opruge ne bi olabavio.

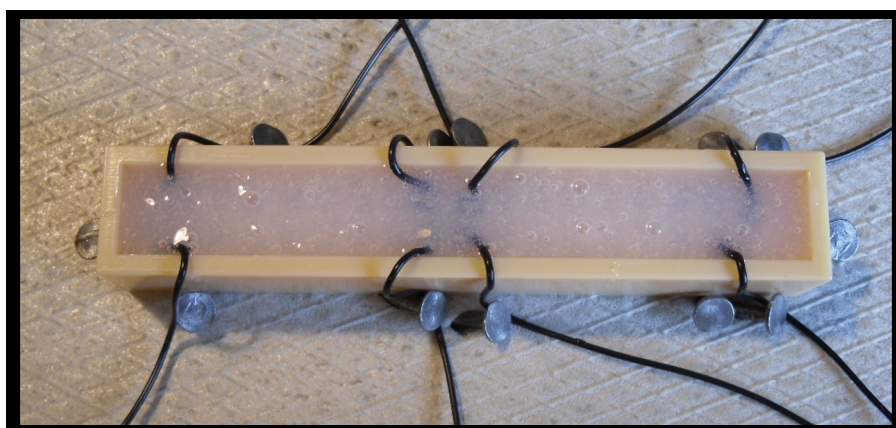
## 8.4 Umetanje aktuatora

Aktuatori se ubacuju u kalup prije lijevanja sa silikonom zbog toga trebaju u kalupu biti fiksni i nepomični kako se tokom lijevanja ne bi pomaknuli u neželjeni položaj.



Slika 50: Montiranje aktuatora u kalup

Da bi aktuatori bili što niže ili pri dnu nožica, kroz kalup mora postojati kanalić [Slika 50]. On može biti implementiran prije izrade kalupa ili se kalup može glodanjem naknadno doraditi. Optimalna širina kanalića za žicu debljine 0.25 mm je 0.5 mm. Kanalić ne smije biti uži zbog mogućeg zapinjanja aktuatora budući da kroz kanalić ne prolazi ravna žica već savijena opruga.



Slika 51: Lijevanje

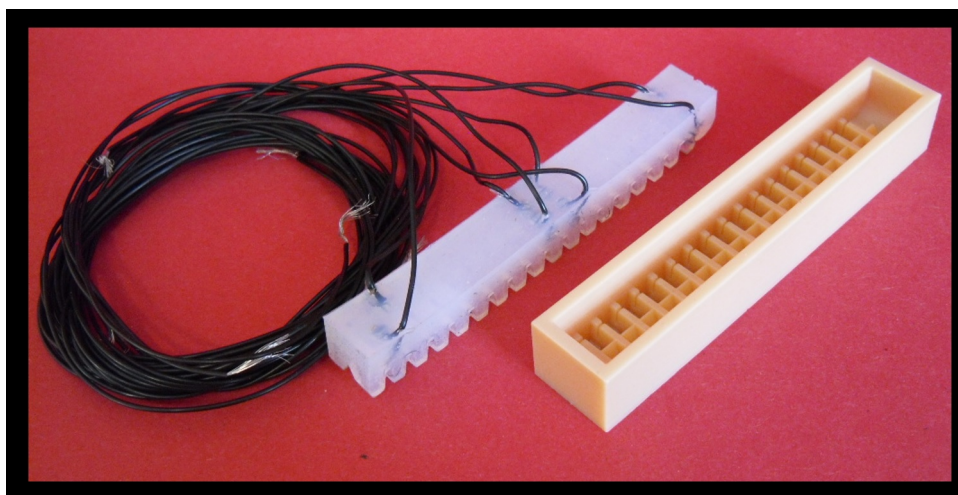


Prije umetanja aktruatora dobro je fiksirati kalup i dovodne žice. Aktuatori se pažljivo umeću pomoću pinceta na način da se svaki puni krug opruge ubaci u jednu nožicu. Svaki novi val tako počinje na istoj točki kružnog luka opruge i pada u kanalić bez dodatnih savijanja i ravnanja opruge. Ako dođe do savijanja opruge ili ravnanja, taj dio opruge neće djelovati pravilno.



Slika 52: Vađenje robota iz kalupa

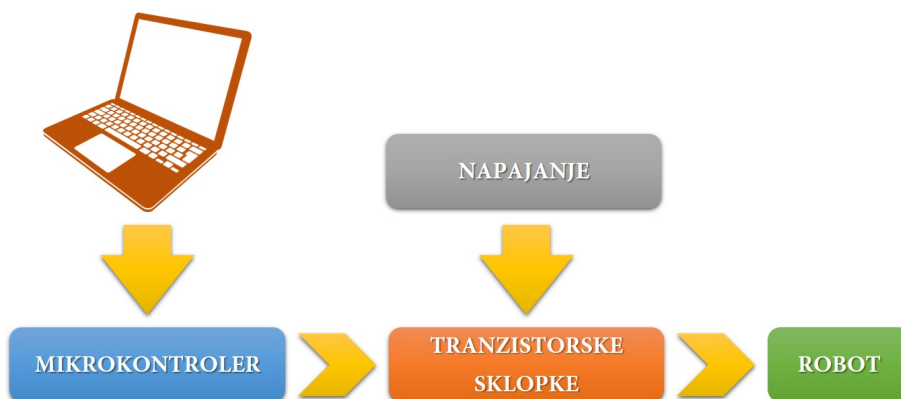
Nakon lijevanja, kada je kalup dobro osušen, robot se izvadi. Najlakše se vadi ako se počinje vaditi na mjestu gdje se nalazi glava [Slika 52]. Tu se robot neće oštetiti te se može vaditi uz pomoć nakog metalnog predmeta. Kada se glava izvadi, robot se može povući prema van, bez zapinjanja aktuatora za kanalić.



Slika 53: Osušen robot

## 9 Upravljačka elektronika

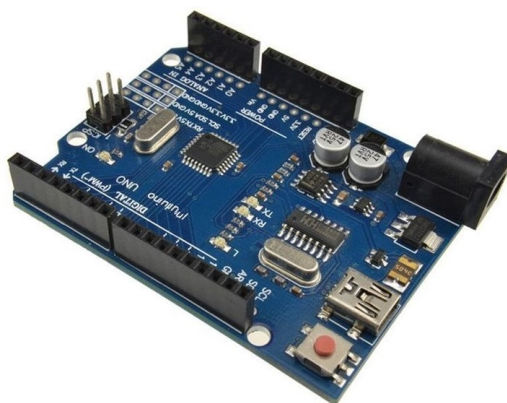
Robot se upravlja mikrokontrolerom koji je na robot povezan preko tranzistorskih sklopki. Razlog tome je taj što za brzo aktiviranje Nitinol opruga treba nekoliko ampera struje na istosmjernom naponu. Mikrokontroler preko digitalnih izlaza sa nekoliko miliampera struje pali tranzistore koji kroz Nitinol opruge propuštaju struju iz izvora napajanja. Paljenje se vrši trenutno u intervalima zadanim programom koji je pohranjen u memoriji mikrokontrolera [Slika 54].



Slika 54: Shema upravljanja

### 9.1 Odabir mikrokontrolera

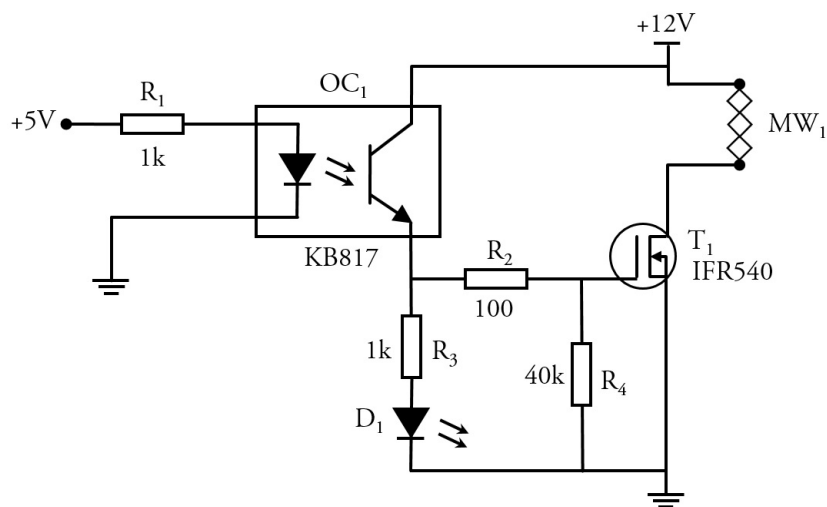
Arduino Uno [Slika 55] je mikrokontroler temeljen na 8-bitnom Atmel-ovom procesoru, ATmega328P. Ima 14 digitalnih ulaza i izlaza od kojih se 6 može koristiti kao pulsno širinska modulacija, 6 analognih ulaza, 16 MHz kvarcnikristal, USB priključak, utičnicu za napajanje, ICSP header i gumb za resetiranje. Sadrži sve što je potrebno za podršku procesora. Jednostavno se spaja na računalo pomoću USB kabela ili programatora.



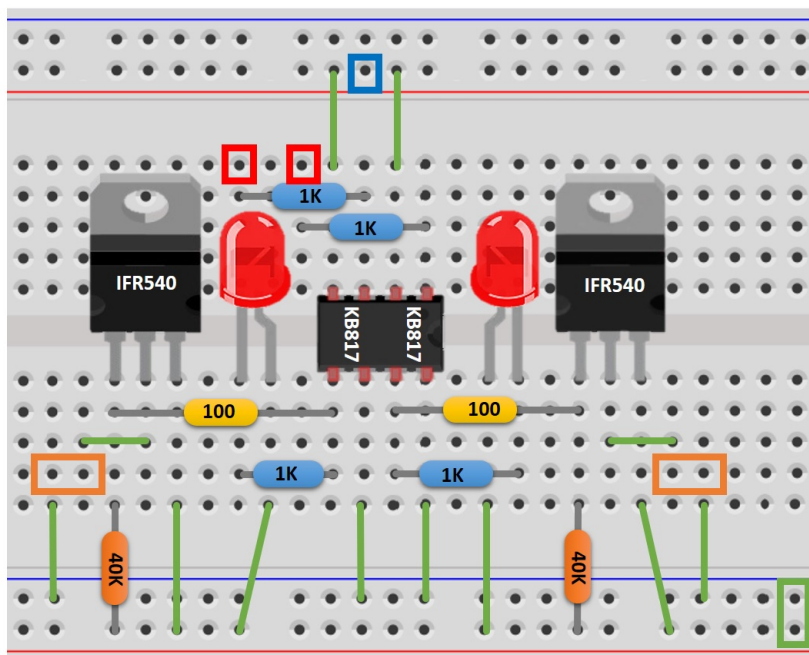
Slika 55: Arduino UNO AtMega 328

## 9.2 Tranzistorske sklopke

Za tranzistorske sklopke koristi se MOSFET IFR540 koji je implementiran prema prikazanoj shemi [Slika 56]. Elektronička shema je preporuka Arduino grupe. U sklop je dodan optoizolator koji razdvaja negativni polaritet mikrokontrolera i izvora napajanja. Digitalni izlaz mikrokontrolera sa otpornikom je ograničen na 5 mA struje koja ulazi u optoizolator. Iz optoizolatora izlazi digitalni signal koji preko baze pali tranzistor. Tranzistor u navedenoj shemi djeluje kao sklopka, odnosno vodi kada kroz njega prolazi struja, tj. ne vodi kad kroz njega ne prolazi struja. Uz vod baze dodani su i indikatori, LED lampice koje se pale i ostaju upaljene za vrijeme rada tranzistora.



Slika 56: Shema tranzistorske sklopke

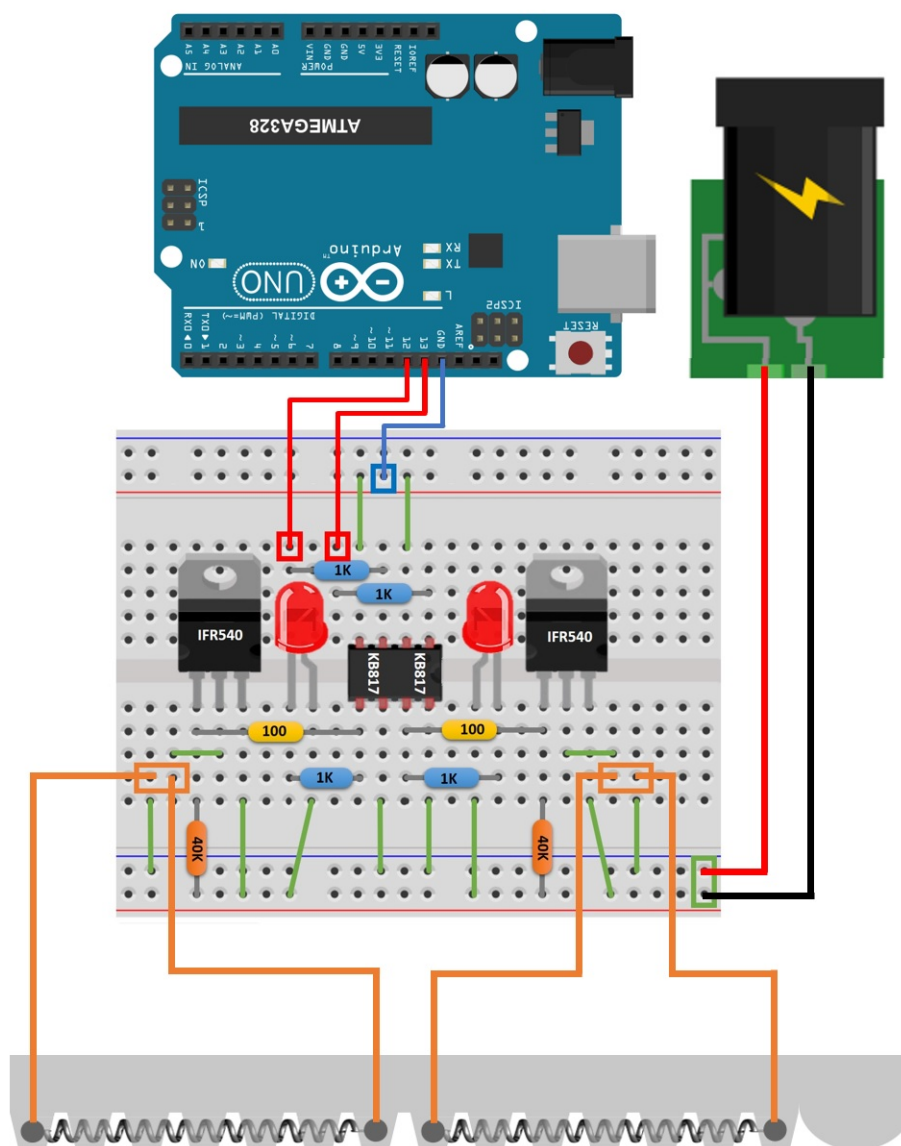


Slika 57: Tranzistorske sklopke za razvojnoj pločici

Tranzistorske sklopke su složene na razvojnoj pločici [Slika 57]. Pločica se sastoji od dva gornja i dva donja voda koja su povezana vodoravno te okomitih linija koje su povezane u suprotnom smjeru od glavnih linija. Svaka linija sadržava točke, odnosno rupe u koje se stavljaju nožice elektroničkih elemenata te se tako može jednostavno i brzo doći do prototipova elektroničkih pločica.

U robotu se nalaze četiri aktuatora koji rade po dva u paru. Za pokretanje takve kombinacije potrebne su dvije tranzistorske sklopke gdje će svaka sklopka pokretati po dva aktuatora u paru.

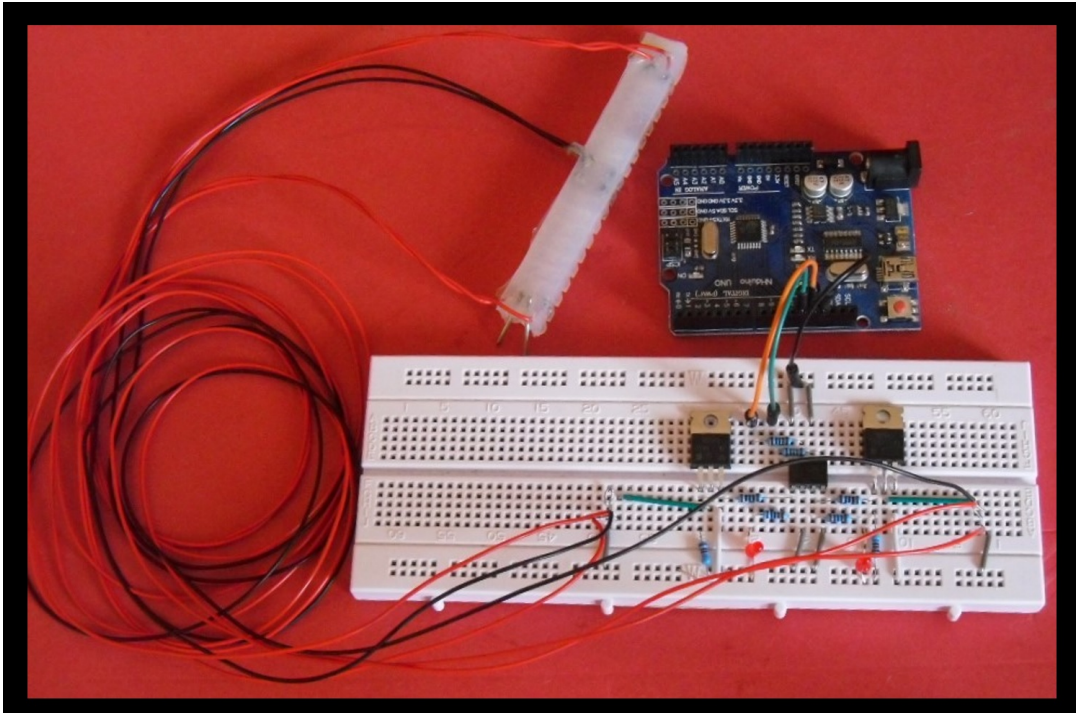
### 9.3 Spajanje robota sa elektroničkom podrškom



Slika 58: Shema sklop robota i elektroničke podrške



Napajanje koje je spojeno na tranzistorske sklopke je istosmjerni napon od 9V [Slika 58]. Izvor napajanja treba biti u stanju dati bar 3 ampera struje. Napajanje mikrokontrolera može biti preko priključka napajanja kojeg sadrži ili preko USB priključka koji istovremeno može služiti za programiranje i napajanje.



Slika 59: Sklop robota i elektroničke podrške

## 9.4 Programiranje robota

Program za pokretanje robota je vrlo jednostavan. Sastoji se od svega nekoliko naredbi za paljenje digitalnih izlaza u željenom vremenskom periodu. Program je sastavljen prema teoriji puzanja koja je objašnjena u predhodnim poglavljima. Za početak programa potrebno je inicijalizirati pinove koji će se koristiti.

```
int MW1 = 13;           // MW1 pin 13
int MW2 = 12;           // MW2 pin 12
```

Kada su pinovi inicijalizirani, potrebno je odrediti njihovu prirodu.

```
void setup()
{
    pinMode(MW1, OUTPUT);    // digital pin as output
    pinMode(MW2, OUTPUT);    // digital pin as output
}
```

Za dobar pokret robota, rad aktuatora treba biti usklađen u vremenu te je potrebno definirati vremensku varijablu koja će određivati vrijeme paljenja aktuatora. Uz rad aktuatora potrebne su i faze hlađenja koje se također definiraju vremenskom varijablom. Treba imati na umu da je hlađenje aktuatora zbroj dvije navedene vremenske varijable  $t_1$  i  $t_2$ , budući da ne rade zajedno, već se njihov rad obavlja isprekidano.

```
int t1 = 1000;           // MW on in ms
int t2 = 2000;           // wait
```

Glavna grana programa sastoji se od naredbi koje određuju stanje digitalnih izlaza koje se beskonačno vrte ukруг. Počinje se dizanjem prvog digitalnog izlaza u visoko stanje te se u tom stanje drži u vremenskom intervalu  $t_1$ . Nakon prolaska tog vremenskog intervala, navedeni digitalni izlaz se baca u nisko stanje i slijedi faza hlađenja. Istovremeno drugi digitalni izlaz se diže u visoko stanje i drži ga se u tom stanju za  $t_1$ . Nakon prolaska vremenske varijable  $t_1$ , slijedi faza mirovanja  $t_2$ . U trenutku kada počinje djelovati varijabla  $t_2$ , prvi aktuator se već hladi za vrijeme dok drugi radi ( $t_1$ ) te će se još nastaviti hladiti za vrijeme  $t_2$ . Drugi aktuator će se za vrijeme  $t_1$  tek početi hladiti te će se nastaviti hladiti za vrijeme rada prvog aktuatora, vremena  $t_1$ .

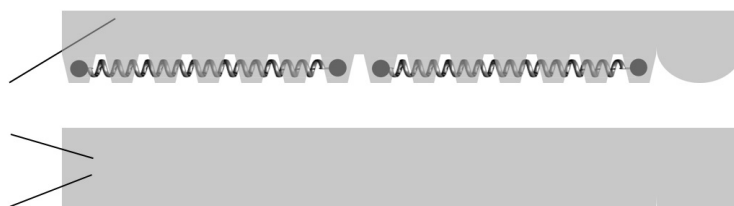
```
void loop()
{
    digitalWrite(MW1, HIGH);delay(t1);    // MW1 on t1
    digitalWrite(MW1, LOW);               // MW1 off
    digitalWrite(MW2, HIGH);delay(t1);    // MW2 on t1
    digitalWrite(MW2, LOW);               // MW2 off
    delay(t2);                            // wait t2
}
```

## 10 Ispitivanje mekog robota

U sklopu ovog rada napravljeno i isprobano je oko desetak mekih robota. Za ispitivanje su odabrani rezultati najuspješnijeg robota te neke male usporedbe u varijantama konstrukcija. Na rezultate svakako najveći utjecaj ima koncentracija i spretnost tokom izrade. Dijelovi s kojima se barata tokom izrade su jako mali te je za njihovo baratanje potreban adekvatan alat, pincete i slično što je dodatan faktor koji utječe na kvalitetu izrade.

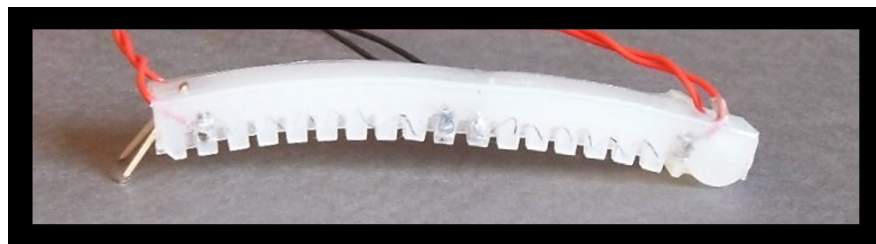
### 10.1 Nožice

Na zadnji dio robota dodane su metalne nožice koje su naoštrene [Slika 60]. Silikon je mekan te se nožice mogu dodati na gotovog i osušenog robota. Razlog tome je potrebna fiksna točka robota od koje se relaksira. Ako se metalne nožice izostave, robot u većini slučajeva stoji na jednom mjestu te se ne miče.



Slika 60: Nožice

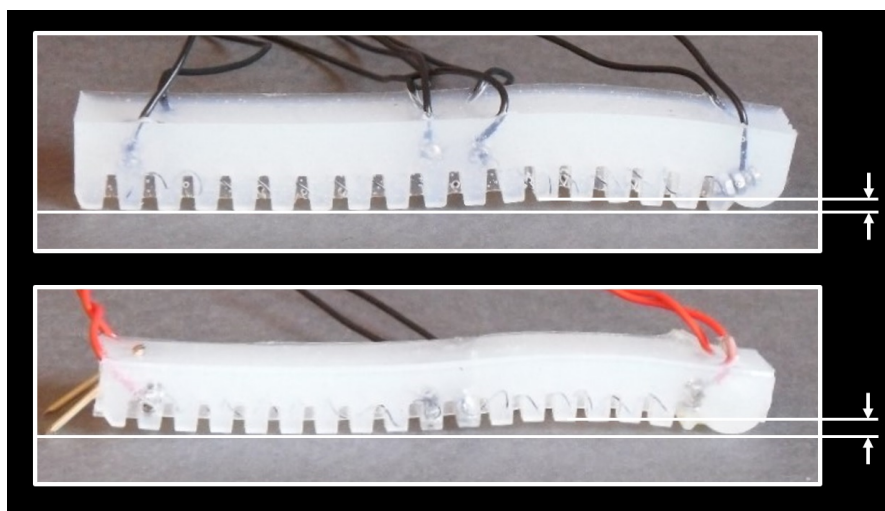
Bitna činjenica kod nožica je da nožice ne smiju zakvačiti za podlogu tijekom faze deformacije, jer će robot povući prema natrag i dok se relaksira zaustaviti će se na početnoj poziciji. Ako nožice ne zapnu, kod faze deformacije zadnjeg dijela, prvi dio robota koji miruje mora osigurati dobro prijanjanje za podlogu. To će omogućiti da se robot kod deformiranja povuče prema naprijed, tj. nastat će promjena dužine koja je bitna za kretanje robota. Kod relaksacije, nožice moraju zapeti na podlogu i tako nastaje fiksna točka od koje će se robot odgurnuti [Slika 61].



Slika 61: Zapinjanje nožica za podlogu

## 10.2 Deformacije robota

Jedan od parametara koji najviše utječe na deformaciju robota je debljina leđa. Niti-nol opruge kod svoje deformacije prema tehničkim specifikacijama mogu postići silu koja je deset puta veća od one koja je potrebna za vraćanje opruge u prijašnje stanje. To znači da sila silikona koji vraća oprugu mora biti u tom rasponu. Ako je silikon tvrdi, odnosno poprečni presjek je veći, deformacije robota će biti manje i obrnuto.



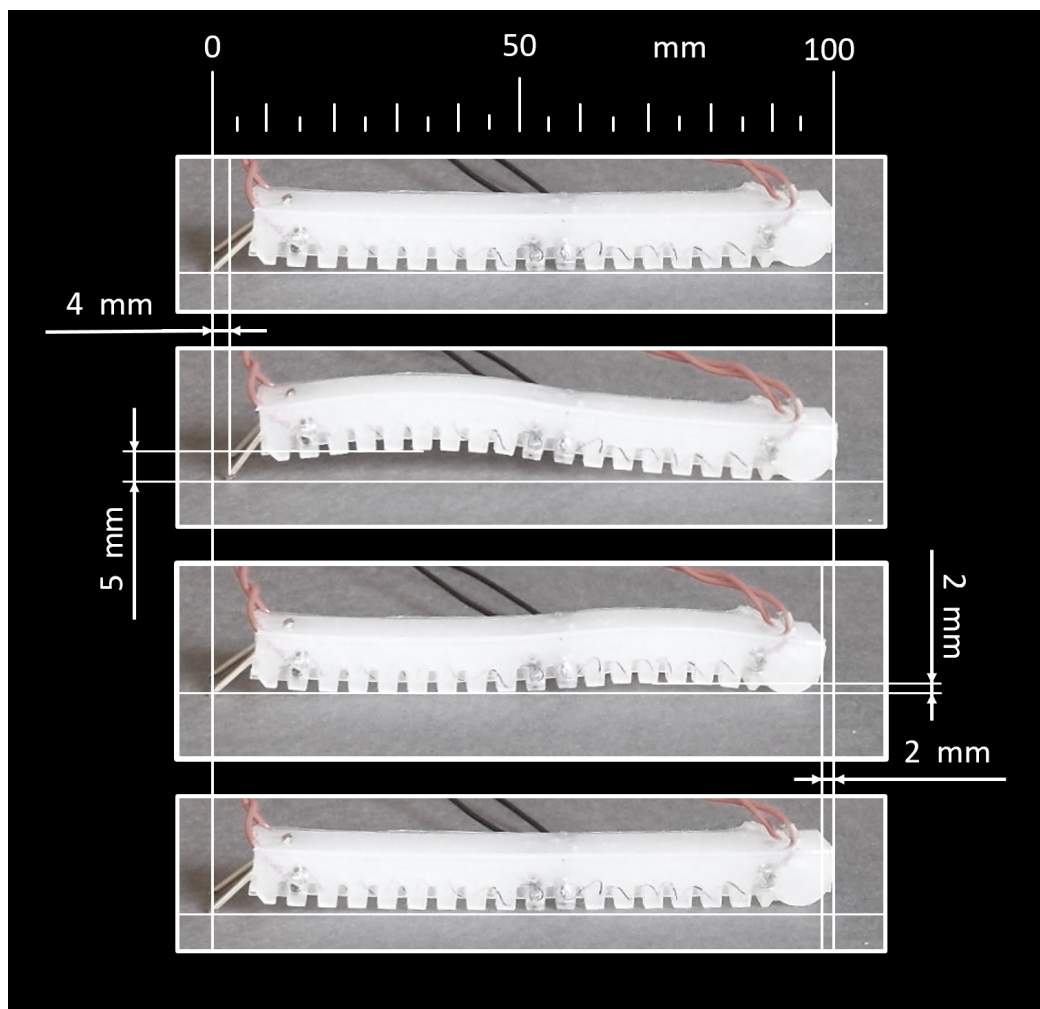
Slika 62: Razlika deformacija u ovisnosti o visini leđa

Visina leđa gornjeg robota je 9 mm, dok je visina leđa donjeg 6 mm. Uočljivo je da donji robot s manjom visinom leđa ima veću deformaciju, no tu je riječ tek o milimetru [Slika 62]. Isto tako, kod donjeg robota je deformacija puno brža i potreban je manji napon za pokretanje deformacije, dok je kod gornjeg robota faza relaksacije brža. Tu treba odabrati kompromis između parametara i odabrati visinu leđa koja nije prekruta za deformaciju, ali još uvijek dovoljna za relativno brzo reklaksiranje robota.

Na deformacije pojedinih režnjeva utječe i broj nožica koje su obuhvaćene pojedinim režnjem. Robot koji se ispituje ima dva režnja, zadnji od 9 nožica i prvi od 8. Zadnji režanj uključuje i metalne nožice koje mu omogućavaju dosta veći pomak u visinu od prvog režnja. Za dobar pokret najvažniji je zadnji režanj koji mora imati najveću deformaciju i pomak. Prvi režanj koristi samo za prebacivanje tijela. Uz prebacivanje prvi režanj sudjeluje i u pokretu, povlačenjem robota prema naprijed.

Deformacije režnjeva u visinu ili podizanje tijela robota, osiguravaju pomak po podlozi na kojoj se nalaze. Pomak po podlozi tijekom deformacija prikazani su na slici. Deformacija stražnjeg režnja postiže pomak od čak 4 mm što je skoro većina cijelog koraka, dok prvi režanj postiže pomak od 2 mm. Pomak prvog režnja u većini slučajeva ne pridonosi koraku, već služi za lakše svaladavanje trenja tijela o podlogu tijekom ciklusa pokreta [Slika 63].





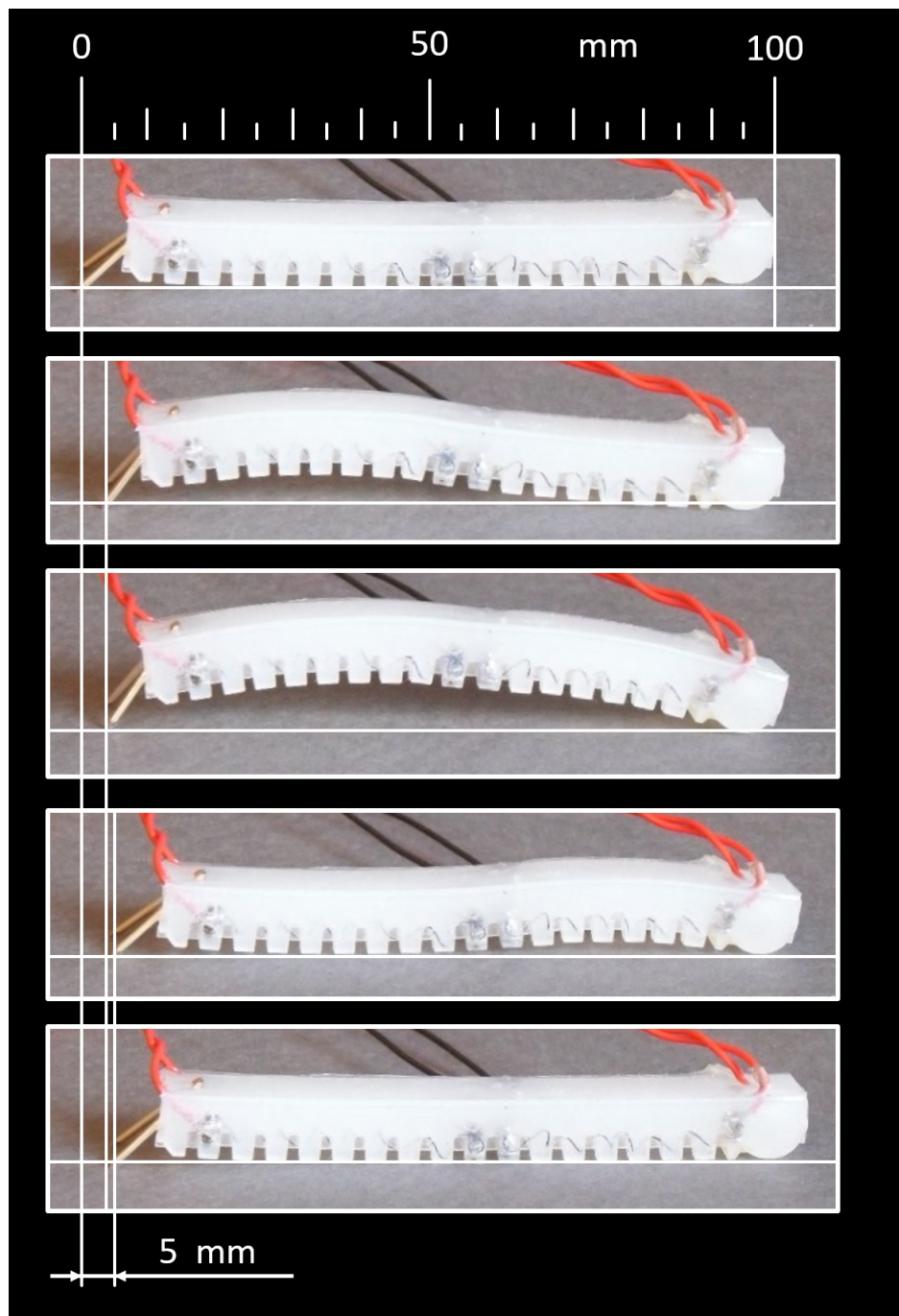
Slika 63: Deformacije pojedinih reznjeva

### 10.3 Ciklus koraka

Kod ciklusa koraka trebaju biti usklađeni parametri vremena, struje i napona. Robor je ispitivan na naponu od 9 V, pri čemu aktuatori u paru povlače nešto manje od 3 A struje, što iznosi malo više od preporučene struje. Vrijeme puštanja struje u aktuator je jedna sekunda, a vrijeme opuštanja 3 sekunde. To je vrijeme dovoljno za dobru deformaciju i dobru relaksaciju pri čemu se robot potpuno spusti na površinu na kojoj se nalazi. To je jako važno, jer u protivnom se metalnenožice ne odvoje od površine i robot zapne i radi pokret na jednom mjestu.

Nitinol opruge izvrše rad onda kada postignu potrebnu temperaturu. U tom slučaju nije važno da li je napon veći ili manji, promjena se događa kod temperature. Parametrima struje i napona utječe se samo na brzinu postizanja temperature prijelaza. Opruge manjih promjera poput ovih korištenih u robotu imaju dovoljno veliki otpor te je dodatno spajanje otpornika Nitinol oprugama nepotrebno. Kod grijanja opruga je jedino bitno da se ne pregriju, tj. vrijeme puštanja struje kroz oprugu mora biti ograničeno.

Ukoliko se poveća nazivni napon, mora se smanjiti vrijeme do postizanja temperature prijelaza, budući da će kod većeg napona aktuatori povući više struje i grijanje će biti brže. No, kod ispitivanja na takvim strujama i naponu jako brzo dolazi do kvara aktuatora jer se pregriju, iako je vrijeme grijanja malo, nekoliko stotina milisekundi. Iako se vrijeme ograniči, opruge odjedanput povuku struje koje su puno veće od preporučenih i zbog toga dolazi do kvara, jer opruge nemogu podnijeti tako veliki tok energije koji prolazi kroz njih. Preporučena snaga iznosi 20W što odgovara naponu od 9 V i 3 A struje, kakvi su i parametri dobrog djelovanja aktuatora kod ispitivanog robota.

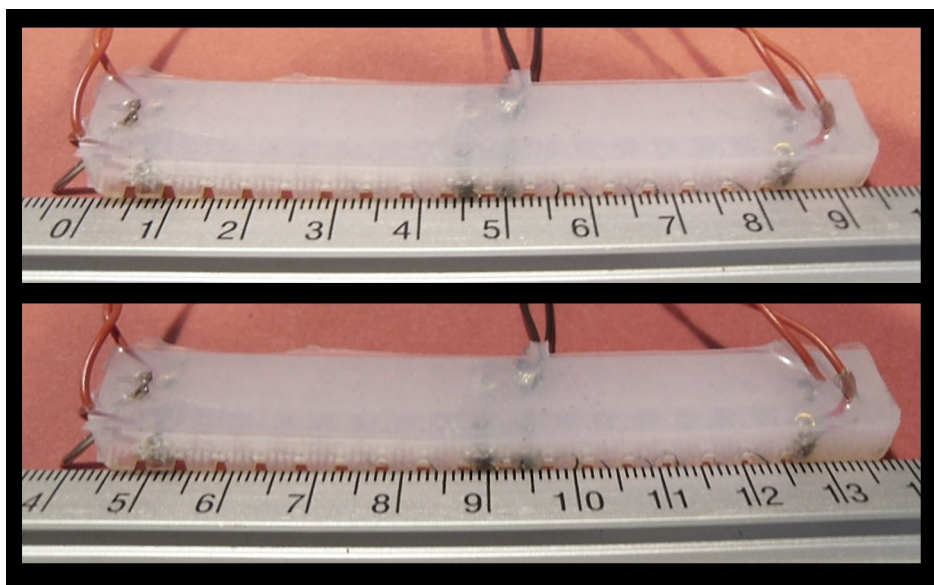


Slika 64: Ciklus robota

Za navedene parametre dobiven je korak od 5 milimetara u jednom ciklusu [Slika 64]. Rezultati ispitivanja uspoređeni su sa teorijom hodanja. Slika prikazuje jedan cijeli ciklus pokreta robota. Počinje sa deformacijom zadnjeg reznja gdje se stvara pokret većine pokreta jednog ciklusa. Pomak zadnjeg reznja tijekom deformacije je čak 4 milimetara. Slijedi faza prebacivanja tijela na prvi reznj gdje se istovremeno relaksira zadnji reznj, a deformira pri. Prvi reznj stvara jako mali pokret, obično u deformaciji od 2 milimetara povlači cijeli robot unaprijed za jedan milimetar. Ukupno sa dobrim prijanjanjem metalnih nožica za podlogu se u jednom ciklusu postiže pokret za 5 milimetara.

## 10.4 Puzanje

Opisani korak nije uvijek savršen i ne dolazi uvijek do konstantnog pomaka od 5 mm po ciklusu. Puzanje uvelike ovisi o podlozi na kojoj se robot nalazi. Jedne od boljih podloga su stiropor, stirodur, guma, linoleum i slične mekane podloge na kojima metalne nožice dobro zapinju. Efikasnost koraka može se povećati ako se prednji reznj namasti motornim uljem ili mazivom za ležajeve, nakon čega prvi reznj ne zapinje robota, što je čest slučaj. Također ukoliko se pretjera s podmazivanjem, kod deformacije zadnjeg reznja, dolazi do pomicanja robota unatrag te se kod relaksacije samo vrati na mjesto s kojeg je pokret krenuo.



Slika 65: Pomak kod dužeg puzanja

Isto tako, kako se ciklusi koraka ponavljaju, silikon oko aktuatora dobro prihvaća toplinu koju otpuštaju aktuatori tijekom ciklusa. No, nakon nekoliko ponovljenih ciklusa, 8 do 10, silikon se na dodir zagrije, i ciklus jednog pokreta se produži zbog vremena koje je potrebno da se aktuatori potpuno ohlade i vrate do podloge u potpunosti. Robot u prosječnom puzanju po gumenoj podlozi, u trajanju od jedne minute prevali put od oko 40 milimetara što je po nekom objektivnom mišljenju zadovoljavajuć pomak [Slika 65].

## 11 Zaključak

Ispitani robot pokazuje dobre deformacije koje su pretpostavljene u fazi konstrukcije. Postignute deformacije stvaraju pomake koji su relativno malih dimenzija, ali su za potrebe puzanja dovoljni. Puzanje izrađenog mekog robota je dobro ako se uzme u obzir da je mehanizam koji stvara hod napravljen od samo dva različita materijala.

Hod kao mehanizam u robotici je veoma složen proces što se pokazalo i u ovom radu. Jedan od većih problema kod hodanja javlja se kod zapinjanja robota o podlogu i situacija u kojoj se robot ne miče. Takvi problemi rješavani su promjenom podloge i ispitivanjem na drugim materijalima gdje ne dolazi do zapinjanja. Također, kod podloge se javlja i problem proklizavanja gdje robot radi svoj ciklus pokreta no ne dolazi do puzanja po podlozi. Za slučaj opisanog mobilnog robota, podloge na kojima najbolje funkcionira su guma, linoleum i stiropor, dok su podloge poput drva, papira i keramike podloge na kojima dolazi do proklizavanja i zapinjanja. Pomak koji robot ostvaruje je dobar i ako se usporedi s duljinom robota, robot u jednoj minuti prevali put od polovice svoje ukupne duljine tijela.

Jedan od nedostataka robota je spremnik energije koji robot nemože nositi na sebi. Spremnik energije, u našem slučaju strujni izvor, je s robotom povezan dugim mekanim žicama koje robot povlači za sobom. U smislu beskonačnog hodanja robot može prevaliti put koji mu dozvoljavaju žice za dovod energije. Zbog toga robot u ovom obliku nije u potpunosti autonoman. Ako bi se na robot ugrađivao spremnik energije, robot bi trebao biti nekoliko puta veći, budući da je energija koja mu je potrebna za rad aktuatora jako velika.

## 12 Literatura

- [1] Barry Trimmer: *Quick guide: Soft robots, Current Biology, 5th August 2013.*
- [2] Roger G. Gilbertson: *Muscle Wires Project Book, Mondo-tronics, Inc., San Rafael USA, 2000.*
- [3] Schoor Marthinus Cornelius Van: *Method and device for measuring strain using shape memory alloy materials, Patent: WO 2003012384 A2*
- [4] Leksikografski zavod Miroslav Krleža: *Hrvatska enciklopedija, Mrežno izdanje, 2017.*
- [5] POLYCHEM d.o.o.: *ALPA-SIL MF 3, Tehnički podaci*
- [6] Jamie K. Paik: *A novel low-profile shape memory alloy torsional actuator, 2010.*
- [7] Matteo Cianchetti: *Fundamentals on the use of Shape Memory Alloys in Soft Robotics*
- [8] Ming H. Wu and L. McD. Schetky: *Industrial Applications For Shape Memory Alloys, 2000.*
- [9] P. K. Kumar and D. C. Lagoudas: *Intro to Shape Memory Alloys, Springer Science+Business Media, LLC 2008.*
- [10] Sangok Seok: *Meshworm - A Peristaltic Soft Robot With Antagonistic Nickel Titanium Coil Actuators, 2012.*
- [11] Corneliu Cismasiu: *Shape Memory Alloys, Sciyo, Rijeka, 2010.*
- [12] Weimin Huang: *Shape Memory Alloys and their Application to Actuators for Deployable Structures, Cambridge, Dissertation, 1998.*
- [13] Jamie Paik: *Soft Components for Soft Robots*
- [14] D. Stoeckel: *The Shape Memory Effect, Phenomenon, Alloys and Applications, 1995.*

## 13 Dodaci

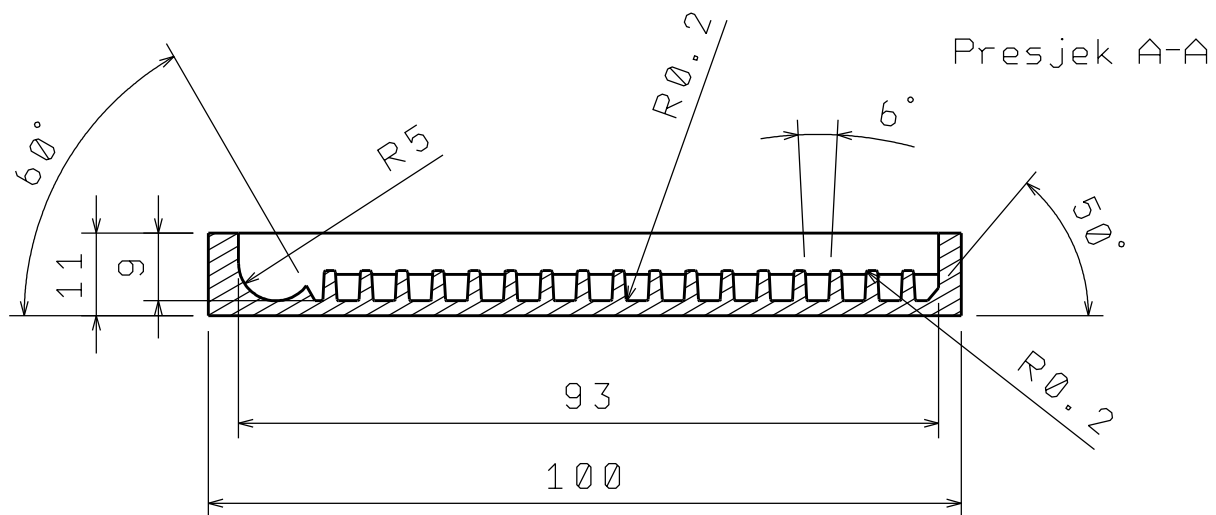
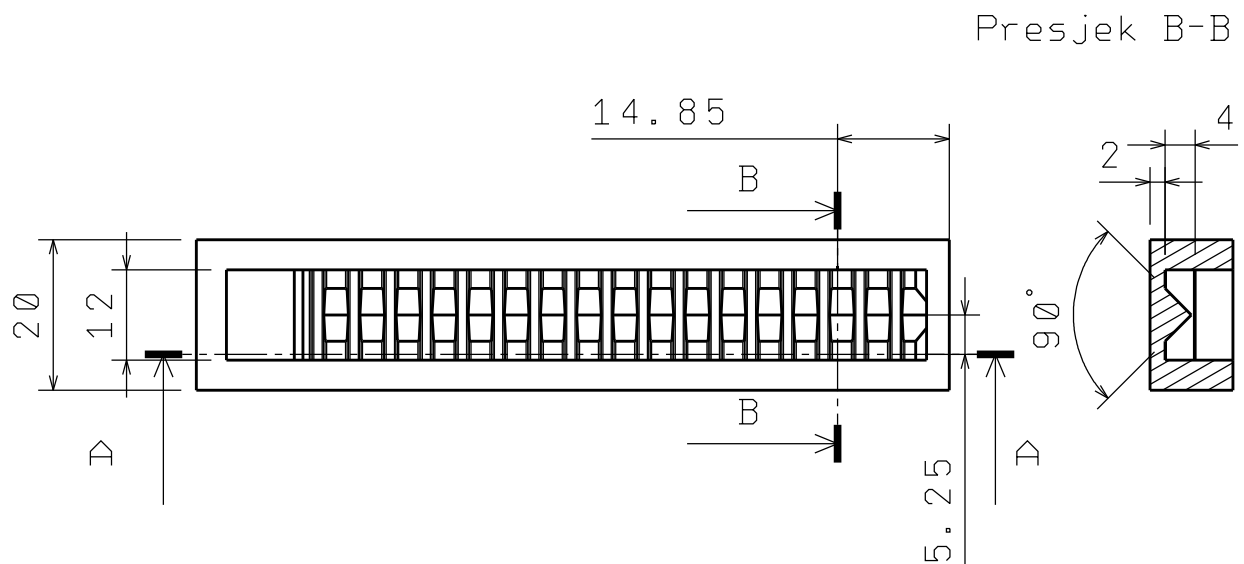
### Programski kod


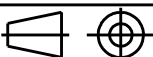
```
// ----- SOFTPILLAR - Mobile Softrobot ----- //
// ----- 05.05.2017. ----- //
// Autor - Klemen Govedic

int MW1 = 13;           // MW1 pin 13
int MW2 = 12;           // MW2 pin 12
int t1 = 1000;          // MW on in ms
int t2 = 2000;          // wait

void setup()
{
  pinMode(MW1, OUTPUT); // digital pin as output
  pinMode(MW2, OUTPUT); // digital pin as output
}

void loop()
{
  digitalWrite(MW1, HIGH);delay(t1); // MW1 on t1
  digitalWrite(MW1, LOW);           // MW1 off
  digitalWrite(MW2, HIGH);delay(t1); // MW2 on t1
  digitalWrite(MW2, LOW);           // MW2 off
  delay(t2);                        // wait t2
}
```



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	1.4.2017.	KLEMEN GOVEDIC		
Razradio		KLEMEN GOVEDIC		
Crtao	1.4.2017.			
Pregledao	5.4.2017.	PETAR CURKOVIC		
Objekt:			Objekt broj:	
KALUP ZA LIJEVANJE SILIKONA			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal:		Masa:		
		Naziv:		Pozicija:
Mjerilo originala		SOFTPILLAR		Format: A4
1:1		Crtež broj:		Listova: 1
				List: 1